

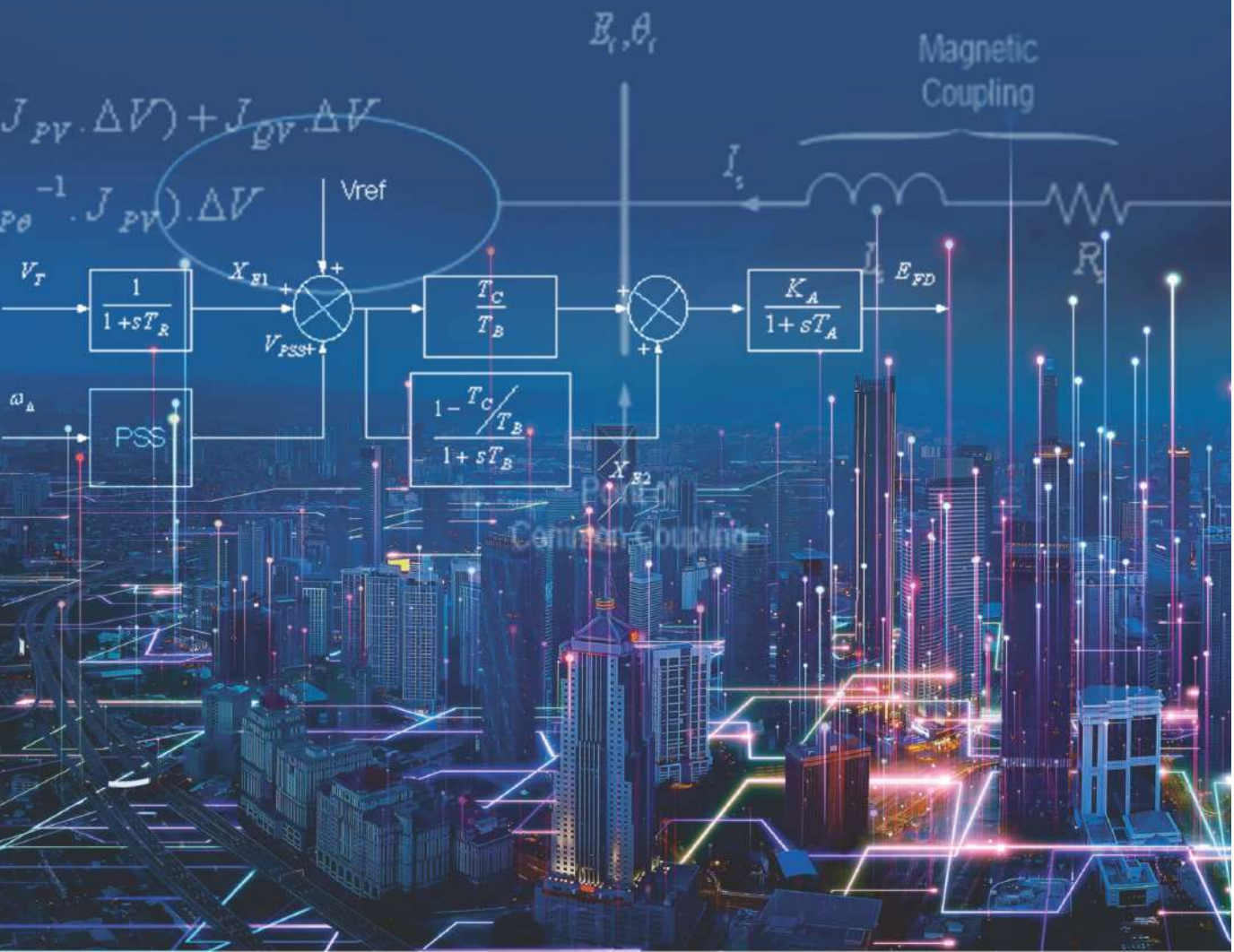


Sistem Tenaga Listrik

Berbasis *Artificial Intelligence*,
FACTS *Devices* dan *Motor Drive*

Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., IPM. | Dr. Eng. Muhammad Abdillah, S.T., M.T.

Ir. Syukriyadin, S.T., M.T., IPM. | Safrizal, S.T., M.T. | Dr. Firdaus, S.Pd., M.T. | Ramly Rasyid, S.T., M.T.



**Sistem Tenaga Listrik
Berbasis Artificial Intelligence,
FACTS Devices dan Motor Drive**

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Sistem Tenaga Listrik Berbasis Artificial Intelligence, FACTS Devices dan Motor Drive

Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., IPM.

Dr. Eng. Muhammad Abdillah, S.T., M.T.

Ir. Syukriyadin, S.T., M.T., IPM.

Safrizal, S.T., M.T.

Dr. Firdaus, S.Pd., M.T.

Ramly Rasyid, S.T., M.T.



Cerdas, Bahagia, Mulia, Lintas Generasi.

**SISTEM TENAGA LISTRIK BERBASIS ARTIFICIAL INTELLIGENCE,
FACTS DEVICES DAN MOTOR DRIVE**

Indar Chaerah Gunadin ... [et al.]

Editor :
Ahmad Khanafi

Desain Cover :
Syaiful Anwar

Sumber :
www.shutterstock.com

Tata Letak :
T. Yuliyanti

Proofreader :
Mira Muarifah

Ukuran :
x, 447 hlm, Uk: 15.5x23 cm

ISBN :
978-623-02-6407-8

Cetakan Pertama :
April 2023

Hak Cipta 2023, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2023 by Deepublish Publisher
All Right Reserved

Hak cipta dilindungi undang-undang
Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau
memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini
tanpa izin tertulis dari Penerbit.

PENERBIT DEEPUBLISH
(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl.Rajawali, G. Elang 6, No 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman

Jl.Kaliurang Km.9,3 – Yogyakarta 55581

Telp/Faks: (0274) 4533427

Website: www.deepublish.co.id

www.penerbitdeepublish.com

E-mail: cs@deepublish.co.id

KATA PENGANTAR PENERBIT

Assalamualaikum, w.r. w.b.

Segala puji kami haturkan ke hadirat Allah Swt., Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan rahmat dan karunia-Nya. Tak lupa, lantunan selawat serta salam senantiasa tercurahkan kepada Nabi Besar Muhammad saw.

Dalam rangka mencerdaskan dan memuliakan umat manusia dengan penyediaan serta pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menciptakan industri *processing* berbasis sumber daya alam (SDA) Indonesia, Penerbit Deepublish dengan bangga menerbitkan buku dengan judul ***Sistem Tenaga Listrik Berbasis Artificial Intelligence, FACTS Devices dan Motor Drive.***

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada para penulis yang telah memberikan kepercayaan, perhatian, dan kontribusi penuh demi kesempurnaan buku ini. Semoga buku ini bermanfaat bagi semua pembaca, mampu berkontribusi dalam mencerdaskan dan memuliakan umat manusia, serta mengoptimalkan pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi di tanah air.

Wassalamualaikum, w.r. w.b.

Hormat Kami,

Penerbit Deepublish

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR PENERBIT	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR SIMBOL.....	ix
BAB I Pendahuluan	1
Sekilas Tentang Sistem Tenaga Listrik Modern	1
Pentingnya FACT Device pada Sistem Tenaga Listrik.....	3
Implementasi <i>Artificial Intelligence</i> pada Sistem Tenaga Listrik.....	4
Bagian 1 STATCOM sebagai Sistem <i>Multi Input Multi Output</i> (MIMO)	9
Kestabilan Tegangan dan Pemodelan Sistem Tenaga Listrik.....	11
<i>Static Synchronous Compensator</i> dan Metode Kontrol.....	32
Simulasi dan Analisis Sistem	60
Studi Kasus Sistem <i>Single Machine Two Bus</i>	60
Studi Kasus Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali.....	65
Intisari	75
Referensi.....	76
Bagian 2 Desain <i>Fuzzy Logic Load Frequency Control</i>: Pada Sistem Tenaga Listrik dengan <i>Artificial Immune</i> System.....	79
Load Frequency Control.....	82
Kontrol Optimal <i>Linear Quadratic Regulator</i> (Lqr), <i>Fuzzy</i> <i>Logic Controller</i> (Flc), dan <i>Artificial Immune System</i> (Ais) via <i>Clonal Selection</i>	112

Simulasi dan Analisis Sistem	149
Intisari	211
Bagian 3 Formulasi <i>Optimal Power Flow</i> dengan Konstrain	
Kestabilan Tegangan.....	214
Persamaan Umum Aliran Daya.....	216
Thyristor Controlled Series Capacitor.....	225
Analisis Kestabilan Tegangan.....	230
Aliran Daya Optimal dengan Konstrain Kestabilan	
Tegangan	238
Penyelesaian Permasalahan OPF.....	245
Mengidentifikasi Formulasi Optimal	252
Daya Suplai Generator dan <i>Demand</i> Beban	255
Tegangan Sistem.....	256
Daya pada Masing-Masing Bus.....	257
Tegangan Kritis dan Daya Kritis Sistem	259
Termal Jaring	262
Intisari	264
Referensi.....	265
Bagian 4 Memilih Lokasi <i>Static VAR Compensator (Svc)</i> untuk	
Perbaikan Keamanan <i>Voltage Collapse</i> dengan	
<i>Genetic Algorithms</i>	267
Kestabilan Tegangan pada Sistem Tenaga Listrik	269
Pemilihan Lokasi SVC menggunakan Metode <i>Genetic</i>	
<i>Algorithms</i>	283
Simulasi dan Analisis.....	294
Bagian 5 Alokasi Rugi Transmisi dan Biaya Daya Reaktif	
dengan Metode Z-Bus & Modifikasi Matriks Y-Bus	316
Rugi-Rugi Transmisi dalam Operasi Sistem Tenaga	
Listrik	320
Daya Reaktif dalam Sistem Tenaga Listrik	328
Sistem Deregulasi	335

Prosedur dan Analisis.....	344
Metode Alokasi Z-Bus	354
Modifikasi Matriks Y-Bus	358
Metode Heuristik	364
Studi Aliran Daya.....	364
Alokasi Rugi-Rugi Transmisi	369
Alokasi Daya Reaktif.....	374
Alokasi Biaya Daya Reaktif	378
Intisari	382
Referensi	383
Bagian 6 Pengaturan Kecepatan Motor Sinkron dengan <i>Hybrid</i>	
<i>Volt dan PI Controller</i>.....	388
Persamaan Motor Sinkron dalam Sistem Koordinat	
Bebas.....	389
Model d-q dari Motor Sinkron	390
Torka Elektromagnetik.....	394
<i>Voltage Source Inverter</i> Enam Langkah	395
Strategi Pengendalian Motor AC dengan VSI Enam	
Langkah	398
Kontroler Proporsional Integral (PI).....	402
Kontrol Kecepatan Motor Sinkron dengan Metode	
Volt/Hertz	405
Kontroler Kecepatan Motor Sinkron dengan Sensor	
Arus	407
Pengaturan Kecepatan Motor Sinkron dengan <i>Hybrid</i>	
<i>Volt</i>	408
Simulasi dan Analisis	417
Intisari	443
Referensi	444
PENULIS.....	446

DAFTAR SIMBOL

B	=	<i>Susceptance</i>
E	=	Tegangan Sumber
G	=	<i>Conductance, S</i>
I	=	Arus, A
K	=	<i>Slope of Voltage, Ohm</i>
P	=	<i>Power, W</i>
Q	=	<i>Reactive Power, VAR</i>
R	=	<i>Resistance, Ohm</i>
S	=	<i>Apparent Power, VA</i>
V	=	<i>Voltage, V</i>
X	=	<i>Reactance</i>
Y	=	<i>Admittance, S</i>
Z	=	<i>Impedance</i>
ϕ	=	<i>Power-factor angle, ° atau radian</i>
Δ	=	Perubahan yang kecil dari....
ω	=	Radian frekuensi, radian/sec

BAB I

Pendahuluan

Sekilas Tentang Sistem Tenaga Listrik Modern

Sistem tenaga listrik modern adalah sistem yang dirancang dengan menggunakan teknologi canggih dan terintegrasi dengan baik untuk menghasilkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan listrik secara efisien dan aman. Sistem ini berbeda dengan sistem tenaga listrik konvensional, yang lebih sederhana dan kurang canggih.

Beberapa komponen kunci dari sistem tenaga listrik modern termasuk sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, tenaga angin, dan tenaga air. Selain itu, sistem ini juga menggunakan teknologi pemantauan dan kendali canggih, seperti sistem pemantauan jarak jauh, kendali jaringan cerdas, dan teknologi IoT. Sistem tenaga listrik modern juga dilengkapi dengan teknologi penyimpanan energi seperti baterai, kapasitor, dan flywheel, yang membantu meningkatkan keandalan dan stabilitas sistem.

Sistem tenaga listrik modern juga menggunakan kendali otomatis yang dilengkapi dengan algoritma cerdas untuk memantau kondisi jaringan dan meresponsnya dengan cepat. Selain itu, sistem ini juga menggunakan sistem transmisi DC yang lebih efisien daripada sistem transmisi AC tradisional.

Sistem tenaga listrik modern sangat penting dalam membantu memenuhi kebutuhan listrik masyarakat modern yang semakin meningkat, sekaligus meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan. Karena itu, terus dikembangkan teknologi baru dan inovatif untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi sistem tenaga listrik modern.

Sistem tenaga listrik modern merupakan sistem yang terdiri dari berbagai komponen teknologi canggih yang terintegrasi secara kompleks. Sistem tenaga listrik modern berbeda dengan sistem tenaga listrik

tradisional karena menggunakan teknologi terbaru dan inovatif untuk menghasilkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan listrik secara lebih efisien dan ramah lingkungan.

Berikut adalah beberapa ciri khas dari sistem tenaga listrik modern:

1. Sumber Energi Terbarukan: Sistem tenaga listrik modern didukung oleh sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, tenaga angin, dan tenaga air. Penggunaan sumber energi terbarukan ini membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dan memperbaiki kualitas udara.
2. Teknologi Pemantauan dan Kendali: Sistem tenaga listrik modern menggunakan teknologi pemantauan dan kendali canggih untuk memantau, mengatur, dan mengoptimalkan operasi sistem. Teknologi ini meliputi sistem pemantauan jarak jauh, kendali jaringan cerdas, dan teknologi Internet of Things (IoT).
3. Teknologi Penyimpanan Energi: Sistem tenaga listrik modern dilengkapi dengan teknologi penyimpanan energi seperti baterai, kapasitor, dan flywheel untuk menyimpan energi yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan. Teknologi ini membantu meningkatkan keandalan dan stabilitas sistem.
4. Sistem Transmisi DC: Sistem tenaga listrik modern menggunakan sistem transmisi DC (Direct Current) yang lebih efisien daripada sistem transmisi AC (Alternating Current) tradisional. Sistem transmisi DC memungkinkan listrik mengalir dengan kehilangan daya yang lebih sedikit dan memungkinkan pengiriman listrik pada jarak yang lebih jauh.
5. Kendali Otomatis: Sistem tenaga listrik modern menggunakan kendali otomatis yang dilengkapi dengan algoritma cerdas untuk mengoptimalkan operasi sistem. Kendali otomatis ini dapat membantu memantau kondisi jaringan dan meresponsnya dengan cepat untuk menjaga operasi sistem yang aman dan stabil.

Dalam keseluruhan, sistem tenaga listrik modern merupakan sistem yang kompleks dan terintegrasi dengan berbagai teknologi canggih

yang membantu menghasilkan, mentransmisikan, dan mendistribusikan listrik secara lebih efisien dan ramah lingkungan.

Pentingnya FACT Device pada Sistem Tenaga Listrik

Kendali dan stabilitas sistem tenaga listrik sangat penting untuk menjaga operasi yang aman, andal, dan efisien dari sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik terdiri dari berbagai komponen seperti generator, transformator, saluran transmisi, dan beban. Kendali dan stabilitas sistem tenaga listrik mencakup berbagai teknologi dan metode untuk memastikan operasi yang stabil dan terkoordinasi dari semua komponen sistem tenaga listrik.

Berikut adalah beberapa teknologi dan metode yang digunakan untuk kendali dan stabilitas sistem tenaga listrik:

1. **Kendali Tegangan dan Frekuensi:** Sistem kendali tegangan dan frekuensi digunakan untuk memastikan bahwa tegangan dan frekuensi dalam sistem tenaga listrik tetap dalam batas yang aman dan sesuai dengan standar internasional. Sistem ini menggunakan sensor dan perangkat kontrol untuk memantau dan mengatur tegangan dan frekuensi dalam sistem tenaga listrik.
2. **Penyeimbangan Beban:** Teknologi penyeimbangan beban digunakan untuk memastikan bahwa beban dalam sistem tenaga listrik terdistribusi dengan baik di seluruh jaringan transmisi. Sistem ini menggunakan algoritma cerdas untuk mengoptimalkan alokasi daya dan memastikan bahwa setiap bagian jaringan transmisi menerima beban yang sesuai dengan kapasitasnya.
3. **FACTS Devices:** Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, FACTS Devices adalah teknologi kontrol yang digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan stabilitas sistem tenaga listrik. Teknologi ini mengontrol parameter seperti tegangan, impedansi, dan arus dalam jaringan transmisi untuk memastikan operasi yang optimal.
4. **Kontrol Aliran Daya:** Teknologi kontrol aliran daya digunakan untuk mengatur aliran daya dalam jaringan transmisi listrik. Sistem ini

menggunakan perangkat kontrol seperti pengendali fase dan pengendali sudut untuk memastikan bahwa aliran daya diatur dengan baik dan aman.

5. Sistem Pengendalian Otomatis: Sistem pengendalian otomatis digunakan untuk memantau dan mengontrol sistem tenaga listrik secara otomatis. Sistem ini menggunakan algoritma cerdas dan sistem komunikasi untuk mengoptimalkan operasi sistem tenaga listrik.

Dalam keseluruhan, kendali dan stabilitas sistem tenaga listrik sangat penting untuk menjaga operasi yang aman, andal, dan efisien dari sistem tenaga listrik. Teknologi dan metode di atas dapat membantu memastikan operasi yang optimal dan terkoordinasi dari semua komponen dalam sistem tenaga listrik.

Implementasi *Artificial Intelligence* pada Sistem Tenaga Listrik

Kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence* atau AI) memainkan peran penting dalam sistem tenaga listrik modern, terutama dalam memaksimalkan efisiensi dan keandalan sistem serta meningkatkan kualitas pelayanan bagi pengguna listrik.

Berikut adalah beberapa contoh peran penting kecerdasan buatan dalam sistem tenaga listrik:

1. Pemantauan dan Kendali Jaringan: Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk memantau jaringan listrik dan mengidentifikasi gangguan yang terjadi. Selain itu, kecerdasan buatan juga dapat digunakan untuk mengatur dan mengendalikan sistem secara otomatis, sehingga mampu mengoptimalkan operasional jaringan listrik dan mengurangi kegagalan yang mungkin terjadi.
2. Prediksi Permintaan: Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk memprediksi kebutuhan energi listrik di masa depan, berdasarkan data-data historis dan faktor-faktor yang mempengaruhinya seperti cuaca, musim, dan kegiatan masyarakat. Dengan demikian, perusahaan penyedia listrik dapat merencanakan produksi listrik dengan lebih baik dan menghindari kekurangan pasokan.

3. Pemantauan Kesehatan Mesin: Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk memantau kesehatan mesin pada pembangkit listrik, sehingga dapat mendeteksi potensi kerusakan atau gangguan pada mesin sebelum terjadi, dan memungkinkan untuk melakukan perbaikan atau penggantian komponen sebelum terlambat.
4. Pengoptimalan Rute Transmisi: Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk mengoptimalkan rute transmisi listrik, sehingga mengurangi kemacetan dan mempercepat waktu pengiriman listrik ke pengguna akhir.
5. Manajemen Energi: Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk mengelola produksi, penyimpanan, dan distribusi energi di dalam rumah tangga atau bangunan komersial, sehingga dapat mengoptimalkan penggunaan listrik dan mengurangi biaya energi.

Dengan adanya kecerdasan buatan dalam sistem tenaga listrik, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi, keandalan, dan pelayanan bagi pengguna listrik, serta mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan dari produksi dan distribusi energi listrik.

Buku ini dimulai dengan menjelaskan teknik pemodelan dan kendali FACTS Device dalam hal ini STATCOM (bagian 1), yang dimodelkan dengan teknik MIMO (Multi Input Multi Output) yang selanjutnya dampak pemasangan STATCOM terhadap kestabilan tegangan sistem tenaga listrik dijelaskan pada bagian ini. Model generator, transmisi, beban dan STATCOM digabungkan dalam satu model simulasi yang mewakili kondisi sistem tenaga. Penempatan STATCOM pada sistem tenaga juga dikaji pada bagian 1 ini, yakni dengan menggunakan Metode Modal Analysis, sehingga STATCOM akan ditempatkan pada bus yang memiliki nilai kestabilan yang terlemah. Pemahaman terkait teknik pemodelan sistem tenaga dalam sebuah model simulasi, akan sangat membantu mahasiswa ataupun peneliti untuk mengkaji dan menganalisa permasalahan yang muncul pada sistem tenaga.

Pada bagian 2, desain *load frequency control* berbasis kontrol cerdas sangat penting untuk menjaga kestabilan frekuensi. Frekuensi

pada sistem tenaga listrik akan berubah dari titik operasinya ketika terjadi perubahan beban. Oleh karena itu, skema kontrol hibrida seperti *fuzzy logic control* (FLC) dan kontrol optimal berbasis *linear quadratic regulator* (LQR) sangatlah tepat secara adaptif untuk menjaga kestabilan frekuensi akibat perubahan beban agar tidak terjadi pemadaman. Untuk mendapatkan parameter FLC dan LQR yang optimal maka digunakan metode *artificial immune system* untuk mengoptimalkan parameter kedua skema control hibrida tersebut.

Pada bagian 3, dijelaskan tentang formulasi optimal power flow (OPF) dengan konstrain kestabilan tegangan yang melibatkan Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC). Fungsi objective yang digunakan dalam permasalahan OPF adalah multi-objective function yang mengoptimalkan social benefit dan pembebanan maksimum yang diselesaikan menggunakan algoritma barrier interior point method (IPM). TCSC digunakan sebagai kendali transfer daya dalam konstrain kestabilan tegangan yang diformulasikan dalam permasalahan optimasi aliran daya. TCSC akan mengatur impedansi jaringan yang memberikan efek aliran daya menjadi optimal, sehingga kemampuan tranfser daya dalam jaringan akan meningkat. Dengan demikian efek pembebanan dapat dimaksimalkan dengan tetap menjaga kestabilan tegangan. Untuk melihat hasil OPM dalam konstrain kestabilan maka dianalisis menggunakan Continuation Power Flow (CPF) yang memiliki metode predictor-corrector. Hasil CPF ini selanjutnya akan di analisis kembali menggunakan Saddle Node Bifurcation (SNB) untuk mengetahui sejauh mana peningkatan transfer daya yang ditandai dengan bertambahnya nilai loading parameter (loading margin) λ yang memiliki jarak optimal dari titik bifurkasi sistem dan tegangan pada masing-masing bus sistem berada dalam limit yang aman. Untuk melihat hasil formulasi optimal power flow (OPF) dengan konstrain kestabilan tegangan tanpa dan dengan pemasangan TCSC Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) maka digunakan software simulasi yaitu PSAT (Power System Analysis Toolbox).

Pada Bab 4, Pemilihan Lokasi Static VAR Compensator (SVC) untuk Perbaikan Keamanan Voltage Collapse dengan Genetic Algorithms, dalam

hal ini menjelaskan pemanfaatan pemasangan SVC pada lokasi optimal jaringan transmisi tegangan ekstra tinggi, yang bersifat dinamik, (*Induktif lagging & Capasitif leading*) terlebih lagi tekanan perubahan fluktuatif beban yang sangat rentan terhadap perubahan kestabilan tegangan (*voltage stability*) sehingga pada akhirnya dapat menimbulkan peristiwa *voltage collapse* oleh karena itu sangat diperlukan lokasi optimal FACTS DEVICE (SVC) yang tepat dengan menggunakan metode *genetic algorithm*, kemudian di komparasi dengan metode *modal analysis*, untuk penempatan SVC pada bus terlemah (*weak Bus*), Pemahaman ini sangat membantu para mahasiswa ataupun teksini serta ademisi untuk mengantisipasi kemungkinan terjadinya peristiwa *voltage collapse* pada system tenaga listrik.

Pada bagian 5 buku ini membahas Alokasi Rugi Transmisi dan Biaya Daya Reaktif dengan Metode Z-Bus & Modifikasi Matriks Y-Bus. Paradigma biaya listrik modern menggambarkan perubahan dalam cara perhitungan dan pengelolaan biaya listrik dalam era modern. Pada sistem tenaga listrik modern, biaya rugi transmisi yang timbul dari pengiriman daya listrik melalui jaringan transmisi akan ditanggung oleh semua pihak, mulai dari pihak pembangkit maupun operator. Oleh karena itu, apabila dalam sistem tenaga listrik modern ada penambahan atau pemasangan peralatan FACTS DEVICE untuk mengurangi rugi-rugi daya dan memperbaiki profil tegangan, maka biaya yang timbul dari pemasangan FACTS DEVICE tersebut akan ditanggung secara bersama oleh semua pihak dalam sistem ketenagalistrikan tersebut. Untuk menentukan alokasi biaya kompensasi daya reaktif yang adil bagi semua pihak, maka dapat dilakukan dengan metode Z bus dan memodifikasi matriks admintansi pada masing-masing bus (Y bus).

Selanjutnya pada bagian terakhir, bagian 6, dijelaskan terkait pengendalian pada sisi beban, dalam hal ini Teknik pengendalian Motor Sinkron dengan menggunakan metode Hybrid Volt dan PI Controller. Persamaan motor sinkron dalam system koordinat bebas dan model d-q diuraikan diawal bagian 6 ini. Selanjutnya, bagaimana pengendalian motor AC dengan VSI enam langkah serta Teknik kendali yang digunakan

menjadi titik focus di uraian berikutnya. Dan akhirnya, model simulasi untuk pengendalian motor sinkron dengan Hybrid Volt/hertz current menggunakan software MATLAB dijelaskan secara detail pada bagian ini.

Bagian 1

STATCOM sebagai Sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO)

Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, ST.,MT.,IPM
indarcg@gmail.com ; indar@eng.unhas.ac.id

Pada rangkaian AC dengan impedansi tahanan murni, tegangan dan arus merupakan sefasa yang memiliki persamaan daya sebagai berikut.

$$P = E_{rms} \times I_{rms}$$

Keterangan:

P = Daya nyata dalam watt

E_{rms} = Tegangan rms (volt)

I_{rms} = Arus rms (ampere)

Perkalian $E_{rms} \times I_{rms}$ merepresentasikan daya nyata sebab bentuk dari daya ini nampak terlihat misalnya: panas atau gerakan mekanik. Akan tetapi bila terdapat reaktansi pada rangkaian AC, perkalian $E_{rms} \times I_{rms}$ memiliki nilai yang lebih besar dari daya nyata. Hal ini terjadi karena daya reaktif yang ditimbulkan oleh energi yang disimpan dan dilepas oleh induktor atau kapasitor.

Pada pengaturan sistem tenaga listrik, kompensasi daya reaktif merupakan hal yang sangat penting. Daya reaktif merupakan penyebab kerugian pada sistem transmisi, mengurangi kemampuan transmisi dan dapat menyebabkan perubahan amplitudo tegangan pada ujung penerima. Sementara perubahan yang cepat dari pemakaian daya reaktif akan membuat osilasi pada tegangan terminal. Perubahan tegangan ini mampu membuat perubahan pemakaian daya nyata pada sistem tenaga yang pada akhirnya akan menghasilkan osilasi daya.

Pada sistem ketenagalistrikan, ada gangguan yang bersifat *transient* (seperti: putus jaringan atau hubung singkat) dan juga yang bersifat dinamik (di sekitar titik kerja). Jenis yang kedua ini terjadi karena perubahan beban yang kecil atau disebut gangguan dinamik [1]. Gangguan dinamik ini dapat menyebabkan kinerja dinamik sistem menjadi tidak baik bahkan dapat membawa sistem ke daerah yang tidak stabil.

Memahami kelakuan dinamik peralatan *FACTS Device* yakni STATCOM maka perlu kita memodelkannya dalam sistem *MIMO (Multi Input Multi Output)*, dan menghindari asumsi atau perkiraan yang akan mempengaruhi nilai karakteristik dari STATCOM. Kontroler STATCOM didesain dengan pendekatan *multivariable control*. Model matematika dinamik dari STATCOM merupakan dasar dalam memperoleh algoritma kontrol [2]

Perbaikan kinerja dinamik STATCOM yang mencakup pengontrolan komponen arus aktif (i_d), dan komponen arus reaktif (i_q), serta tegangan kapasitor Vdc perlu dilakukan. Dengan begitu, peralatan ini mampu mengkompensasi daya reaktif secara cepat dan mampu menstabilkan sistem dalam waktu yang relatif singkat.

Umpan balik LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) merupakan gabungan dari umpan balik LQR (*Linear Quadratic Regulator*) dan estimator optimal (*filter Kalman*). LQR (*Linear Quadratic Regulator*) merupakan konsep optimalitas sistem multivariabel yang didasarkan pada indeks kinerja kuadratis untuk kasus–kasus deterministik, sementara filter Kalman merupakan estimator optimal fungsinya ialah untuk mengestimasi variabel keadaan dan berfungsi untuk menyaring derau. Dengan LQG (*Linear Quadratic Gaussian*), kita dapat mengatur secara optimal dari sinyal kesalahan dan juga dari energi yang diperlukan [3].

Untuk menginjeksikan arus reaktif agar sistem berada dalam kondisi stabil, diperlukan waktu penginjeksian yang cepat. Karena itulah dibutuhkan pengontrolan STATCOM yang baik. Sudah banyak pengontrolan STATCOM menggunakan PI dan LQR, namun kedua metode

ini dalam perancangannya tidak memperhatikan keadaan *disturbance* dan *noise*.

Kita perlu mengetahui karakteristik dinamik **agar mampu** memperbaiki karakteristik tersebut. Untuk itu, STATCOM dalam hal ini digunakan sebagai sistem *Multi Input Multi Output* (MIMO) dan menghindari asumsi-asumsi atau perkiraan-perkiraan yang akan mempengaruhi nilai karakteristik STATCOM. Pembahasan ini diharapkan dapat menghasilkan teknik pengontrolan pada STATCOM yang lebih baik. Sehingga akan diperoleh STATCOM yang memiliki respons dinamik dan *transient* yang lebih baik.

Kestabilan Tegangan dan Pemodelan Sistem Tenaga Listrik

Konsep Dasar Kestabilan Tegangan

Kestabilan dan kontrol tegangan bukan menjadi masalah baru di dalam sistem tenaga. Hal tersebut saat ini telah menjadi masalah yang sangat menarik untuk diteliti. Beberapa tahun terakhir ini ketidakstabilan tegangan berperan dalam beberapa kasus *collapse*-nya sistem sebagai berikut.

1. Gangguan pada sistem New York Pool pada tanggal 22 September 1970
2. Gangguan pada sistem Florida, 28 Desember 1982
3. Gangguan pada sistem French, 19 Desember 1978 dan 12 Januari 1987
4. Gangguan pada sistem Northern Belgium, 4 Agustus 1982
5. Gangguan pada sistem Swedish, 27 Desember 1983
6. Gangguan pada sistem Jepang, 23 Juli 1987

Dengan kasus-kasus di atas, kata "*Voltage Instability*" dan "*Voltage Collapse*" sering muncul di dalam diskusi perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik.

Kestabilan tegangan merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan yang diperbolehkan di semua bus setelah gangguan terjadi. Sistem akan masuk pada kondisi ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan beban atau pada saat

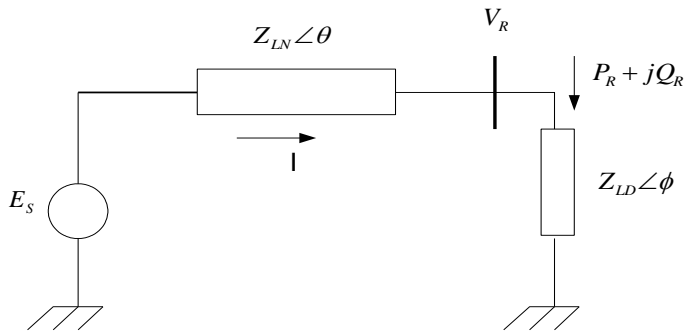
terjadi perubahan kondisi sistem yang disebabkan oleh drop tegangan yang tidak terkontrol. Penyebab utama ketidakstabilan ialah ketidakmampuan sistem tenaga dalam memenuhi permintaan daya reaktif. Hal ini biasanya berhubungan dengan susut tegangan saat daya aktif dan daya reaktif mengalir melalui reaktansi induktif pada jaringan transmisi.

Kriteria kestabilan tegangan dinyatakan sebagai keadaan saat kondisi titik operasi untuk setiap bus pada sistem dan magnitude tegangan pada bus meningkat ketika terjadi peningkatan injeksi daya reaktif pada bus yang sama. Sistem tidak akan stabil jika paling tidak satu bus pada sistem tegangannya (V) menurun pada saat injeksi daya reaktif (Q) pada bus yang sama meningkat. Artinya, tegangan sistem akan stabil jika *sensitivity* kurva V - Q bernilai positif pada setiap bus sedangkan tegangan sistem tidak stabil jika sensitivitas kurva V - Q bernilai negatif pada salah satu bus.

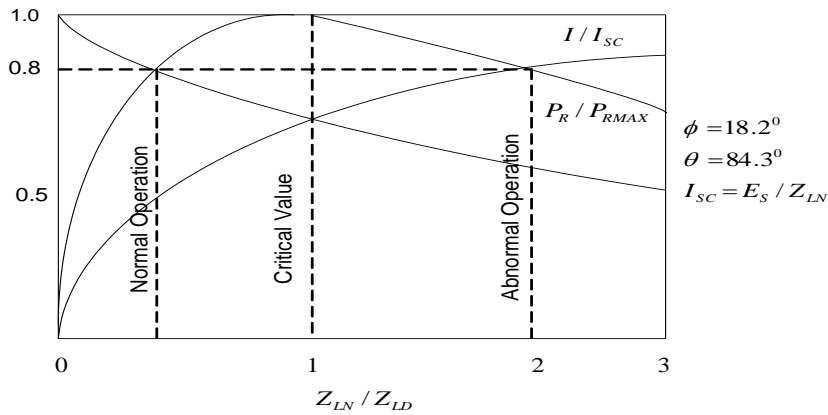
Umumnya masalah ketidakstabilan tegangan terjadi pada saat sistem berada dalam kondisi tekanan yang berat (*heavily stressed systems*). Jika terjadi gangguan maka *Voltage Collapse* akan terjadi dengan penyebab utama adalah kelemahan sistem tenaga. Untuk meningkatkan kekuatan jaringan transmisi dan tingkat transfer daya, beberapa hal yang harus diperhatikan antara lain atas kontrol pembangkitan daya reaktif, karakteristik beban, karakteristik dari peralatan kompensator reaktif, peralatan untuk mengontrol tegangan seperti ULTCs dan FACTS.

a. Karakteristik Sistem Transmisi

Karakteristik pada transmisi berfungsi untuk menentukan hubungan antara daya yang disalurkan (P_R), Tegangan pada ujung penerima (V_R), dan injeksi daya reaktif (Q_i). Agar lebih jelas, berikut sistem radial yang bisa merepresentasikan karakteristik sistem transmisi.



(a). Single Line Diagram



(b). Tegangan pada ujung penerima, arus dan daya sebagai fungsi dari beban

Gambar 1.1 Karakteristik dari Sistem Radial Sederhana

Dari Gambar 1.1 (b) ini, besar arus I dan tegangan ujung penerima V_R dan daya P_R dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut.

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_S}{Z_{LN}} \quad (2.1)$$

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \quad (2.2)$$

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \varphi \quad (2.3)$$

dengan:

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) \cos(\theta - \varphi) \quad (2.4)$$

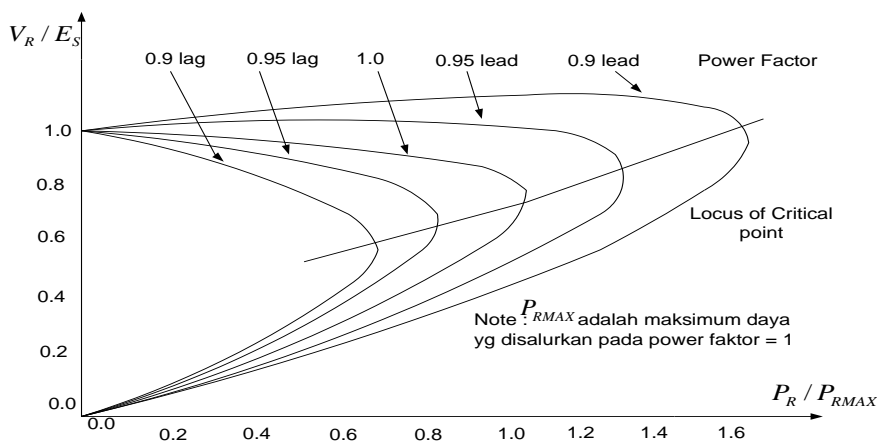
Apabila beban meningkat (Z_{LD} menurun), P_R akan meningkat secara cepat ketika pertama kali kemudian melambat sebelum mencapai maksimum lalu mengalami penurunan. Artinya, terdapat nilai maksimum dari daya aktif yang dapat disalurkan melalui impedansi dengan tegangan sumber yang konstan. Daya menjadi maksimum jika jatuh tegangan pada *line* V_R ialah sama dengan $Z_{LD} / Z_{LN} = 1$. Kondisi ini merupakan batas maksimum daya yang diperbolehkan dalam pengoperasian. Nilai dari V_R dan I pada kondisi transfer daya maksimum dinyatakan sebagai *critical value*.

Ketika nilai dari daya yang ditransferkan lebih kecil dibandingkan daya maksimum ($P_R < P_{RMAX}$), titik operasi memiliki dua daerah pada dua nilai Z_{LD} yang berbeda. Hal ini sesuai dengan Gambar 2.1(b) untuk nilai $P_R = 0.8$. Daerah sebelah kiri berkaitan dengan daerah operasi normal. Di sebelah kanan (daerah abnormal operasi), I lebih besar dan V_R lebih rendah dibandingkan daerah operasi sebelah kiri.

Untuk permintaan beban yang lebih besar dibandingkan nilai maksimum daya yang ditransferkan, pengaturan dilakukan dengan cara mengubah beban menjadi tidak stabil. Hal ini karena peningkatan admitansi beban akan mengurangi daya. Dalam kondisi ini, tegangan beban mungkin akan turun tergantung karakteristik tegangan beban. Dalam karakteristik admitansi beban konstan, kondisi kestabilan sistem berada di tingkat tegangan yang lebih rendah dibandingkan operasi normal. Di sisi lain, apabila beban yang disuplai melalui

transformer dengan ULTC dengan mengubah *tap-changer* akan menaikkan tegangan beban, namun juga mengurangi keefektifan Z_{LD} . Fenomena inilah disebut sebagai *voltage instability*.

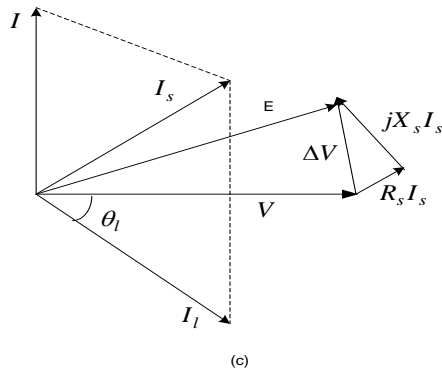
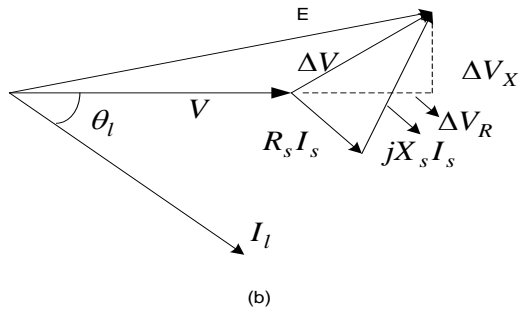
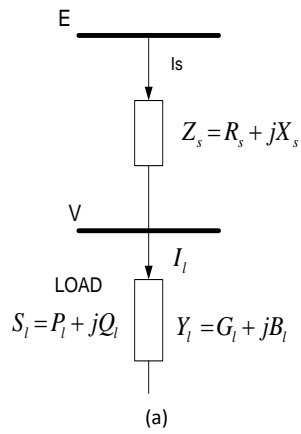
Persamaan 2.4 menunjukkan, bahwa nilai maksimum (P_R) dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan tegangan sumber E_S dan atau menurunkan ϕ . Fenomena ini dapat dilihat dari hubungan antara nilai V_R dan P_R , untuk kondisi nilai *power factor* yang berbeda dengan tegangan sumber E_S yang konstan seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 1.2 Karakteristik $P_R - V_R$ dari Sistem

b. Pengaturan Tegangan Sistem

Pengaturan tegangan merupakan perubahan magnitude tegangan (dalam p.u) terhadap perubahan arus beban. Hal ini terjadi karena adanya drop tegangan pada impedansi yang menuju beban seperti gambar berikut.



Gambar 1.3 (a) Rangkaian Ekuivalen dari Beban dan Sistem *Supply*
 (b) Diagram *Phasor* Tanpa Kompensator (c) Diagram *Phasor* dengan Kompensator

Tanpa kompensator, tegangan *supply* berubah karena arus beban I_l seperti pada gambar (b) sebagai ΔV

$$\Delta V = E - V = Z_s I_l \quad (2.5)$$

Sedangkan nilai

$$Z_s = R_s + jX_s \quad (2.6)$$

$$I_l = \frac{P_l - jQ_l}{V} \quad (2.7)$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} \Delta V &= (R_s + jX_s) \left[\frac{P_l - jQ_l}{V} \right] \\ &= \frac{(R_s P_l + X_s Q_l)}{V} + j \frac{X_s P_l - R_s Q_l}{V} \\ &= \Delta V_R + j\Delta V_X \end{aligned} \quad (2.8)$$

Perubahan tegangan memiliki komponen ΔV_R yang sefasa dengan V dan komponen ΔV_X , di mana perubahan tegangan tergantung pada daya real dan daya reaktif pada beban.

Dengan menambah sebuah kompensator yang paralel dengan beban, sangat mungkin untuk membuat nilai $|E|=|V|$. Artinya, membuat nilai perubahan tegangan sama dengan nol, atau untuk menjaga besar tegangan *supply* E tetap konstan sampai ke beban. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.3.c. Daya reaktif Q_l pada Persamaan 2.8 diperoleh dari $Q_s = Q_\gamma + Q_l$, dan Q_l nilai diatur dengan jalan memutar arah *phasor* dari ΔV sehingga $|E|=|V|$. Dari Persamaan 2.5 dan 2.8 diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$|E|^2 = \left[V + \frac{R_s P_l + X_s Q_s}{V} \right]^2 + \left[\frac{X_s P_l - R_s Q_s}{V} \right]^2 \quad (2.9)$$

Pada kenyataannya, nilai Q_γ akan diperoleh secara otomatis dengan *loop control*, sehingga kompensator daya reaktif dalam hal ini dapat menjaga perubahan tegangan yang disebabkan oleh perubahan daya aktif dan reaktif dari beban.

c. Rumus Pendekatan untuk Pengaturan Tegangan

Apabila pada bus beban terjadi hubung singkat, maka daya kompleks dari hubung singkat menjadi:

$$S_{sc} = P_{sc} + jQ_{sc} = E I_{sc}^* = \frac{E^2}{Z_{sc}^*} \quad (2.10)$$

Nilai $Z_{sc} = R_s + jX_s$ dan I_{sc} adalah arus hubung singkat. Jika $|Z_{sc}^*| = |Z_{sc}|$, diperoleh:

$$R_s = |Z_{sc}| \cos \phi_{sc} = \frac{E^2}{S_{sc}} \cos \phi_{sc} \quad (2.11)$$

$$X_s = |Z_{sc}| \sin \phi_{sc} = \frac{E^2}{S_{sc}} \sin \phi_{sc}, \text{ dengan } \tan \phi_{sc} = \frac{X_s}{R_s} \quad (2.12)$$

$X : R$ adalah *ratio* dari *supply system*. Dengan memasukkan nilai R_s dan X_s pada persamaan 2.4.4 dan juga diasumsikan bahwa $E/V \cong 1$, maka akan diperoleh persamaan sebagai berikut.

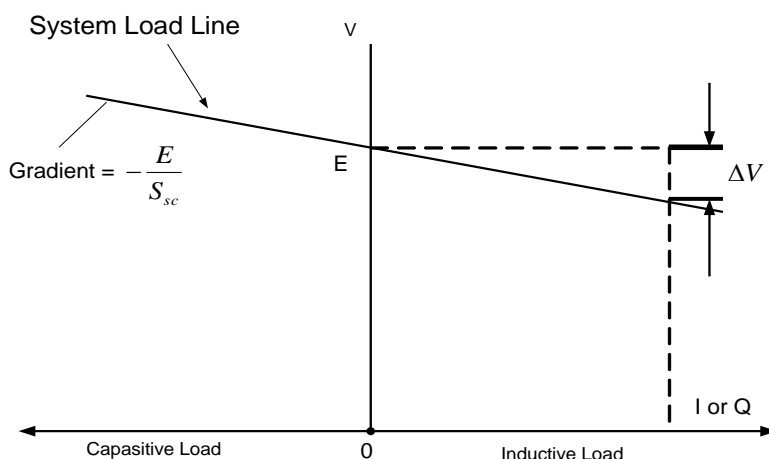
$$\frac{\Delta V_R}{V} \cong \frac{1}{S_{sc}} [P_l \cos \phi_{sc} + Q_l \sin \phi_{sc}] \quad (2.13)$$

$$\frac{\Delta V_X}{V} \cong \frac{1}{S_{sc}} [P_l \sin \phi_{sc} - Q_l \cos \phi_{sc}] \quad (2.14)$$

ΔV_X sangat sering diabaikan. Apabila tahanan *supply* R_s jauh lebih kecil dibandingkan tahanan X_s , maka perubahan tegangan terjadi karena perubahan daya real ΔP_l dapat diabaikan, sehingga perubahan tegangan dirumuskan sebagai berikut.

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{\Delta V_R}{V} = \frac{\Delta Q_l}{S_{sc}} \sin \phi_{sc} \cong \frac{\Delta Q_l}{S_{sc}} \quad (2.15)$$

Hubungan antara perubahan tegangan dan arus beban biasa disebut dengan *system load line* atau *supply system voltage characteristic*. Meskipun hanya pendekatan, namun kurva berikut sangat berguna dalam menjelaskan pengaruh dari kompensator.



Gambar 1.4. Karakteristik dari Tegangan *Supply System*

Pemodelan Sistem Tenaga

Untuk menganalisis sistem tenaga, dibutuhkan metode analisis yang jelas. Langkah pertama ialah model sistem harus diperoleh dan digambarkan secara detail. Generator sinkron diwakilkan dalam bentuk model klasik [9] atau model dua sumbu, dengan eksitasi sistem dituliskan dalam model ETMSP Type-30 [10]. Tidak boleh dituliskan parameter jaringan dalam kondisi *steady-state* untuk model impedansi beban yang

konstan. Asumsinya, reaktansi internal generator adalah konstan, jaringan dapat direduksi menjadi bus-bus internal generator. Persamaan atas komponen sistem tenaga yang bermacam-macam dapat digabungkan melalui persamaan jaringan yang telah direduksi melalui transformasi bersama. Selanjutnya baru kita akan memperoleh persamaan diferensial aljabar sebagai berikut.

$$\dot{X} = f(X, Z, u) \quad (2.16)$$

$$0 = g(X, Z) \quad (2.17)$$

X adalah vektor *state* variabel dari persamaan diferensial, dan Z adalah vektor variabel jaringan.

Solusi dari studi aliran daya yang diperoleh digunakan untuk kondisi operasi, khususnya berupa daya aktif dan reaktif beban, di mana daya aktif dibangkitkan pada bus-bus generator dan magnitude tegangan pada bus tertentu. Solusi ini memberikan nilai besar tegangan dan sudut dari semua bus. Dengan nilai tegangan dan daya yang diinjeksikan pada setiap generator bus, kondisi awal untuk *state* variabel selanjutnya dapat dihitung. Persamaan *state* dan persamaan jaringan setelah itu dilinearisasi, dan persamaan *state-space* yang merepresentasikan sistem tenaga diperoleh sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \dot{X}_{\Delta} &= AX_{\Delta} + FZ_{\Delta} \\ GX_{\Delta} &= HX_{\Delta} \end{aligned} \quad (2.18)$$

X_{Δ} adalah peningkatan *state* variabel; Z_{Δ} adalah peningkatan variabel jaringan, kemudian A,F,G dan H adalah matriks koefisien.

a. Model Generator

Model Klasik

Model klasik merupakan model paling sederhana untuk menjelaskan generator tanpa kontrol eksitasi dalam sistem multi mesin. Beberapa asumsi dasar yang digunakan adalah sebagai berikut.

1. Input daya mekanik adalah konstan.

2. Damping atau daya asinkron diabaikan
3. Tegangan konstan dari model reaktansi *transient* untuk mesin sinkron
4. Sudut rotor mekanik dari mesin sama dengan sudut dari tegangan reaktansi *transient*.

Setelah representasi impedansi konstan, bus beban dan tegangan terminal bus generator dihilangkan, maka jaringan hanya terdiri dari bus generator (jumlahnya dari 1 sampai ke-n). Reaktansi generator dan impedansi beban konstan dimasukkan ke matriks admitansi Y_{bus} dari jaringan yang sudah direduksi.

Persamaan dinamik untuk model klasik dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$M_i \dot{\omega}_i = P_i - P_{ei} \quad (2.19)$$

$$\dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_s \quad i = m + 1, m = 2, \dots, n \quad (2.20)$$

$$P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \quad (2.21)$$

$$P_{ei} = \sum_{j=1, j \neq i}^n [E_i E_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + E_i E_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (2.22)$$

dan

E_i : Tegangan internal bus generator i

M_i : Konstanta *inertia* dari generator i

P_{mi} : Daya input mekanik generator i

G_{ii} : Konduktansi dari bus i

$G_{ij} + B_{ij}$: Admitansi transfer antara node i dan node j dari jaringan yang direduksi

ω_i : Kecepatan rotor generator i

ω_s : Kecepatan sinkron

δ_i : Sudut rotor dari generator i

Model Two-axis

Generator dengan eksitasi kontrol ditulis model *two-axis* untuk melihat efek *transient* dengan asumsi sebagai berikut.

1. Dalam persamaan tegangan, perubahan dari flux bocor sumbu d-q diabaikan
2. $\omega \equiv \omega_s = 1 \text{ p.u.}$

Resultan dari persamaan dinamik diberikan sebagai berikut.

$$\tau'_{do} \dot{E}'_{qi} = E_{FDi} - E'_{qi} + (x_{di} - x'_{di}) I_{di} \quad (2.23)$$

$$\tau'_{qo} \dot{E}'_{di} = -E'_{di} - (x_{qi} - x'_{qi}) I_{qi} \quad (2.24)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - (I_{di} E'_{di} + I_{qi} E'_{qi}) + (x'_{qi} - x'_{di}) I_{qi} I_{di} - \frac{D_i}{\omega_s} (\omega_i - \omega_s) \quad (2.25)$$

$$\dot{\delta} = \omega_i - \omega_s \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.26)$$

Keterangan:

E'_d, E'_q : Tegangan sumbu *direct* dan *quadrature stator*

I_d, I_q : Arus stator sumbu d dan q

τ'_{do}, τ'_{qo} : Konstanta waktu *transient* dari sumbu d dan q

x_d, x'_d : Reaktansi sinkron dan *transient* sumbu d

x_q, x'_q : Reaktansi sinkron dan *transient* sumbu q

E_{FD} : Tegangan stator yang berhubungan dengan tegangan medan

D_i : Koefisien damping dari generator *i*

Referensi sudut

Pada Persamaan (2.4) dan (2.8), kita menggunakan sudut rotor mutlak ($\delta_i, i = 1; 2; \dots; n$) sebagai variabel *state*. Jika terdapat n variabel *state* yang tidak saling berdiri sendiri, maka sudut rotor relatif dapat

diperoleh sebagai variabel *state* baru yang berdiri sendiri. Sudut δ_1 dipilih sebagai referensi, lalu sudut relatif rotor dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\delta_{i1} = \delta_i - \delta_1, \quad i = 2, 3, \dots, n \quad (2.27)$$

Persamaan dinamik (2.3) sampai (2.8) akan berubah dengan cara mengganti setiap δ_i dengan δ_{i1} dan ω_s dengan ω_1 . Sehingga persamaan (2.4) dan 2.8) menjadi sebagai berikut.

$$\dot{\delta}_{i1} = \omega_i - \omega_1 \quad i = 2, 3, \dots, n \quad \dot{\delta} = \omega_1 - \omega_1 = 0 \quad (2.28)$$

Model Sistem Eksitasi

Sistem eksitasi menggunakan tipe-30 ETMSP, seperti pada Gambar 2.1. Variabel *state* yakni E_{FD} , X_{E1} , dan X_{E2} yang selanjutnya dapat dilihat pada persamaan-persamaan berikut.

$$\dot{E}_{FDi} = \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \cdot x_{E2i} - \frac{1}{T_{Ai}} E_{FDi} + \frac{aK_{Ai}}{T_{Ai}} (V_{REFi} + V_{PSSi} - x_{E1i}) \quad (2.29)$$

$$\dot{x}_{E1i} = -\frac{1}{T_R} x_{E1i} + \frac{1}{T_R} V_{Ti} \quad (2.30)$$

$$\dot{x}_{E2i} = -\frac{1}{T_{Bi}} x_{E2i} + \frac{1-a}{T_{Bi}} (V_{REF} - x_{E1i}) \quad (2.31)$$

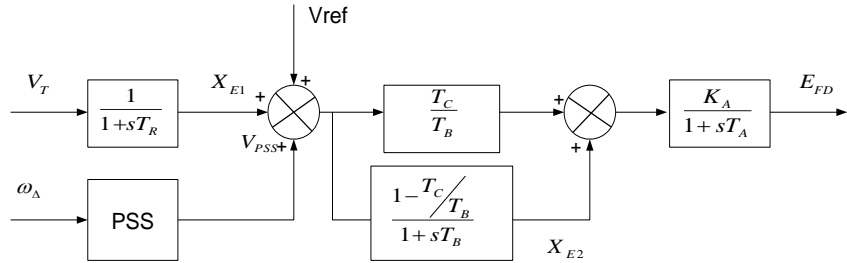
$$\begin{aligned} V_T &= V_{Tqi} + jV_{Tdi} \\ &= (E'_{qi} + x'_{di} I_{di}) + j(E'_{di} - x'_{qi} I_{qi}) \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2.32)$$

Keterangan:

V_T : Tegangan terminal generator

V_{REF} : Tegangan referensi *exciter*

$a = \frac{T_{Ci}}{T_{Bi}}$, T_{Bi} dan T_{Ci} adalah konstanta waktu



Gambar 1.5 Model Eksitasi: ETMSP Type-30

Model Jaring

Beban impedansi konstan digunakan dengan cara mengeliminasi semua node beban, jaring direduksi sehingga yang tersedia hanya generator internal bus. Matriks admitansi Y_{bus} terdiri dari elemen diagonal yakni $Y_{ii} \angle \theta_{ii} = G_{ii} + jB_{ii}$, dan elemen bukan diagonal $Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$. Kemudian arus dari tiap generator adalah sebagai berikut.

$$I_{qi} = \sum_{j=1}^m [F_{G+B}(\delta_{ij})E'_{qj} - F_{B-G}(\delta_{ij})E'_{dj}] + \sum_{k=m+1}^n F_{G+B}(\delta_{ij})E_k \quad (2.33)$$

$$I_{di} = \sum_{j=1}^m [F_{B-G}(\delta_{ij})E'_{qj} - F_{G+B}(\delta_{ij})E'_{dj}] + \sum_{k=m+1}^n F_{B-G}(\delta_{ij})E_k \quad (2.34)$$

$$I_k = \sum_{j=1}^m [F_{G+B}(\delta_{ij})E'_{qj} - F_{B-G}(\delta_{ij})E'_{dj}] + \sum_{l=m+1}^n F_{G+B}(\delta_{ij})E_l \quad (2.35)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$k, l = m+1, \dots, n$$

Keterangan:

$$F_{G+B}(\delta_{ij}) = G_{ij} \cos(\delta_{ij}) + B_{ij} \sin(\delta_{ij}) \quad (2.36)$$

$$F_{B-G}(\delta_{ij}) = B_{ij} \cos(\delta_{ij}) - G_{ij} \sin(\delta_{ij}) \quad (2.37)$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$

Persamaan Sistem Keseluruhan

Seluruh persamaan dari generator, *exciter* dan STATCOM dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\dot{X} = f(X, Z, u) \quad (2.38)$$

$$X^T = [X_{SM}^T, X_{ES}^T, X_{STATCOM}^T] \text{ Vektor State Variabel}$$

$$X_{SM} = [E_{q1}, E_{d1}, \omega_1, \delta_{11}]^T$$

$$X_{ES} = [E_{FD}, X_{E11}, X_{E21}]^T$$

$$X_{STATCOM} = [I_d, I_q, V_{dc}]^T$$

$$Z = [V_2, \theta_2]^T, \text{ Non- State Variabel}$$

$$u = [\alpha], \text{ Input Kontrol}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \\ \dot{x}_{10} \\ Z_1 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{E}_{q1} \\ \dot{E}_{d1} \\ \dot{\omega}_1 \\ \dot{\delta}_{11} \\ E_{FD} \\ \dot{X}_{E11} \\ \dot{X}_{E21} \\ \dot{I}_d \\ \dot{I}_q \\ \dot{V}_{dc} \\ V_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix}$$

f adalah vektor fungsi nonlinear yang dituliskan sebagai berikut.

$$f_{1i} = \dot{E}'_{qi} \quad i=1, \dots, m \quad (2.39)$$

$$= \frac{1}{\tau_{doi}} \left[E_{FDi} - \dot{E}_{qi} + (x_{di} - x'_{di}) I_{d1} \right]$$

$$f_{2i} = \dot{E}'_{di} \quad i=1, \dots, m \quad (2.40)$$

$$= \frac{1}{\tau_{qoi}} \left[-E'_{di} - (x_{qi} - x'_{qi}) I_{qi} \right]$$

$$f_{3i} = \dot{\omega}_i \quad i=1, \dots, n \quad (2.41)$$

$$= \frac{1}{M_i} \left[P_{mi} - (I_{di} \cdot E'_{di} + I_{qi} \cdot E'_{qi}) + (x'_{qi} - x'_{di}) I_{qi} I_{di} - \frac{D_i}{\omega_s} (\omega_i - \omega_s) \right]$$

$$f_{4i} = \dot{\delta}_{i1} \quad i=1, \dots, n \quad (2.42)$$

$$= \omega_i - \omega_1$$

$$f_{5i} = \dot{E}_{FD} \quad i=1, \dots, m \quad (2.43)$$

$$= \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \cdot X_{E2i} - \frac{1}{T_{Ai}} E_{FDi} + \frac{aK_{Ai}}{T_{Ai}} (V_{REFi} - X_{E1i})$$

$$f_{6i} = \dot{X}_{E1i} \quad i=1, \dots, m \quad (2.44)$$

$$= -\frac{1}{T_{Ri}} X_{E1i} + \frac{1}{T_{Ri}} V_{Ti}$$

$$f_{7i} = \dot{X}_{E2i} \quad i=1, \dots, m \quad (2.45)$$

$$= -\frac{1}{T_{Bi}} X_{E2i} + \frac{1-a}{T_{Bi}} (V_{REF} - X_{E1i})$$

$$f_8 = \dot{I}_d \quad (2.46)$$

$$= -\frac{R\omega_s}{L_s} i_d + \omega_s i_q + \frac{\omega_s K}{L} \cos(\theta) V_{dc} - \frac{\omega_s K}{L} V_s \cos \theta$$

$$f_{9i} = \dot{I}_{qi} \quad (2.47)$$

$$= -\omega_s i_d - \frac{R\omega_s}{L_s} i_q + \frac{\omega_s K}{L} \sin(\theta) V_{dc}$$

$$f_{10i} = \dot{V}_{dci} \quad (2.48)$$

$$= M \cos(\delta) i_d + M k \sin(\delta) i_q - \frac{C \omega_b}{R_p} V_{dc}$$

Setelah dilakukan proses linearisasi Persamaan (2.38), maka diperoleh sebagai berikut.

$$\Delta \dot{X} = \frac{\partial f}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial f}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial f}{\partial u} \Delta u \quad (2.49)$$

Sementara persamaan aljabar jaringan adalah sebagai berikut.

$$0 = g(X, Z) \quad (2.50)$$

Persamaan-persamaan ini dilinearisasikan dan diatur. Dengan begitu, semua bentuk yang berhubungan dengan variabel aljabar diletakkan di salah satu sisi persamaan dan *state* variabel diletakkan di bagian lain dari persamaan. Dengan begitu, maka akan diperoleh bentuk *state space* dari sistem.

$$\Delta \dot{X} = A \Delta X + F \Delta Z + B \Delta u \quad (2.51)$$

$$G \Delta Z = H \Delta X \quad (2.52)$$

Keterangan:

$$A = \frac{\partial f}{\partial X}, \quad F = \frac{\partial f}{\partial Z}, \quad B = \frac{\partial f}{\partial u} \quad (2.53)$$

Penempatan STATCOM

Metode analitik penting digunakan untuk memperkirakan terjadinya *Voltage Collapse* pada sistem tenaga listrik, khususnya sistem yang kompleks dan besar. *Modal analysis* atau nilai *eigen* merupakan salah satu alat untuk mengetahui mekanisme terjadinya ketidakstabilan tegangan. Metode ini didasarkan pada perhitungan nilai *eigen* dan *vector eigen* yang kecil dari matriks Jacobian yang sudah direduksi.

Bus yang lemah pada sistem dapat diidentifikasi berdasarkan sensitivitas perubahan daya reaktif sistem terhadap perubahan magnitude tegangan di bus. Batas kestabilan atau jarak ke kondisi *Voltage Collapse* dapat diperkirakan dengan cara membuat kurva Q-V pada bus. Setelah bus yang lemah pada sistem sudah diperoleh, maka peralatan bantu seperti STATCOM akan dipasang pada bus ini sehingga kita bisa meningkatkan kestabilan sistem.

a. Metode *Modal Analysis*

Analisis metode ini sangat bergantung pada matriks Jacobian dari aliran daya. Dari persamaan aliran daya untuk Metode Newton-Raphson, kita bisa memperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Keterangan:

ΔP dan ΔQ = perubahan daya aktif dan reaktif

ΔV dan $\Delta \theta$ = perubahan tegangan dan sudut

$$J = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} = \text{matriks Jacobian}$$

Kestabilan tegangan sistem dipengaruhi oleh nilai P dan Q, meskipun pada titik operasinya dianggap, nilai P adalah konstan dan asumsinya adalah bahwa kestabilan tegangan dipengaruhi oleh perubahan Q. Dengan begitu, kita dapat memperoleh pendekatan

metode kurva Q-V sehingga persamaan (1) dianggap bahwa nilai $\Delta P=0$, dan diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\Delta P = J_{P\theta} \cdot \Delta\theta + J_{PV} \cdot \Delta V = 0 \quad (2.55)$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta} \cdot \Delta\theta + J_{QV} \cdot \Delta V \quad (2.56)$$

Dari Persamaan (2.55) diperoleh:

$$\Delta\theta = -(J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV} \cdot \Delta V) \quad (2.57)$$

Kemudian Persamaan (2.57) disubstitusikan ke Persamaan (2.56) diperoleh:

$$\Delta Q = J_{Q\theta} \cdot (-J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV} \cdot \Delta V) + J_{QV} \cdot \Delta V \quad (2.57)$$

$$\Delta Q = (J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}) \cdot \Delta V$$

$$\Delta Q = J_R \cdot \Delta V \quad (2.58)$$

Sedangkan:

$$J_R = (J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{P\theta}^{-1} \cdot J_{PV}) \quad (2.59)$$

Keterangan:

J_R = matriks Jacobian reduksi

Persamaan (5) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2.60)$$

Nilai *eigen* dan *eigen vector* dari matriks Jacobian reduksi digunakan untuk menganalisis kestabilan tegangan yang dapat dilihat dari bentuk nilai *eigen* dari matriks J_R . Nilai *eigen* dari matriks J_R memiliki tiga kemungkinan sebagai berikut.

1. Jika nilai $(\lambda_i) = 0$, tegangan sistem akan *collapse*
2. Jika nilai $(\lambda_i) > 0$, tegangan sistem stabil

3. Jika nilai $(\lambda_i) < 0$, tegangan sistem tidak stabil

b. Penentuan Bus yang Lemah

Nilai *eigen* minimum merupakan indikasi kedekatan sistem dengan ketidakstabilan. Menentukan bus yang lemah atau partisipasi dari setiap bus agar tidak stabil merupakan hal yang sangat penting. Untuk itulah dibuat metode yang disebut *participation factor*.

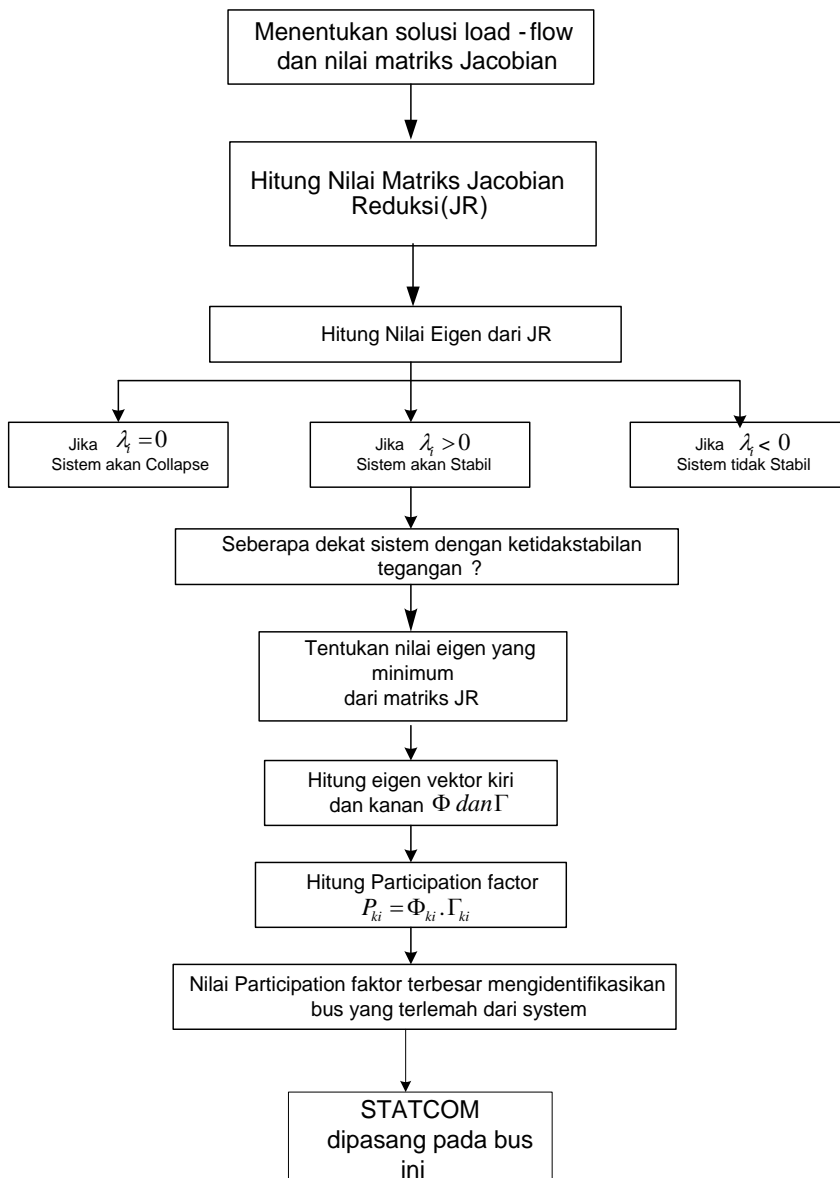
Jika nilai Φ_i dan Γ_i yang merupakan *eigen vector* sebelah kanan dan sebelah kiri untuk nilai *eigen* (λ_i) dari matriks J_R telah diperoleh, maka nilai *participation factor* dari bus k_i untuk nilai (λ_i) dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$P_{ki} = \Phi_{ki} \Gamma_{ki} \tag{2.61}$$

Perlu dipahami, bahwa untuk semua nilai *eigen* yang kecil, bus *participation factor* dapat menentukan dekatnya suatu bus menuju kondisi tidak stabil.

Algoritma Penentuan Bus yang Lemah

Untuk menentukan tempat pemasangan STATCOM pada sistem Sulselrabar, maka dibuat algoritma penentuan bus yang lemah. Algoritma ini didasarkan pada metode *Modal Analysis* yang dapat dilihat pada diagram berikut.



Gambar 1.6 Algoritma Pemasangan STATCOM pada Bus yang Lemah

Static Synchronous Compensator dan Metode Kontrol

Meningkatnya kompleksitas sistem tenaga listrik membuat kita memerlukan sistem yang aman, terkontrol dengan baik, stabil, dan ekonomis, serta memiliki *power quality* yang baik. Sistem deregulasi kelistrikan membutuhkan peralatan-peralatan bantu untuk meningkatkan kualitas dari sistem tenaga. Peralatan *FACT controller* merupakan salah satu peralatan yang sangat penting pada sistem tenaga. Keunggulan dari peralatan ini adalah kecepatan dalam memperbaiki keadaan sistem tenaga.

Kegunaan FACTS adalah untuk mencegah kekurangan dari peralatan yang masih didasarkan pada pengontrolan mekanik. STATCOM merupakan peralatan FACTS yang terhubung paralel dengan jaringan. Peralatan ini akan membangkitkan tegangan sinusoidal menggunakan frekuensi fundamental. Nilai amplitudo dan sudut fasa dari tegangan dapat dikontrol secara cepat oleh peralatan ini.

Gambar 1.7 menunjukkan, bahwa STATCOM yang terhubung ke bus *Inverter* GTO terdiri dari beberapa *voltage source inverter* (VSI) yang dihubungkan ke bus melalui trafo *multi winding*. Kegunaan beberapa *inverter* ini adalah untuk mengurangi distorsi harmonisa pada tegangan *output*. *Inverter* ini juga dihubungkan dengan sebuah *capasitor* untuk membangkitkan tegangan DC.

Dalam praktiknya, kontrol *Proportional Integral* (PI) digunakan untuk mengatur tegangan yang diinginkan. Di sini kita akan menggunakan beberapa metode kontrol akan dikembangkan agar diketahui mana saja menunjukkan performansi yang jauh lebih baik dari metode kontrol PI dalam respons dinamik.

STATCOM

STATCOM merupakan peralatan kompensasi daya reaktif yang terhubung paralel dengan sistem yang mampu membangkitkan atau menyerap daya reaktif pada bus. Keluaran dari peralatan ini dapat diatur sesuai kebutuhan sistem. STATCOM merupakan konverter sumber tegangan, dari input tegangan DC menjadi tegangan AC 3 fasa. Setiap fasa

di dalamnya akan dihubungkan dengan tegangan AC sistem melalui sebuah reaktansi (yang diperoleh dari *leakage inductance* dari transformer penghubung). Sementara tegangan DC dihasilkan dari sebuah kapasitor penyimpanan energi. STATCOM dapat meningkatkan performansi sistem di beberapa area sebagai berikut.

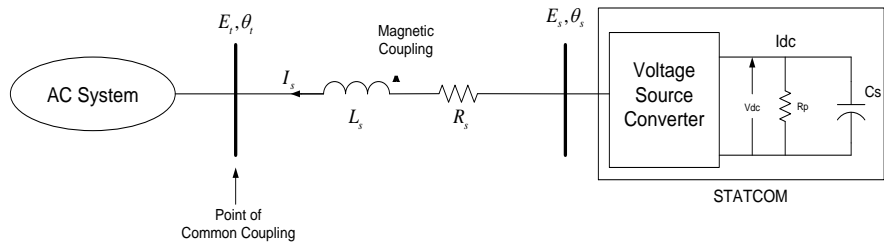
1. *Dynamic voltage control* pada sistem transmisi dan distribusi.
2. *Power-oscillation damping* pada sistem transmisi daya
3. *Transient Stability*
4. *Voltage Flicker Control*
5. Mengontrol tidak hanya daya reaktif tapi (jika dibutuhkan) daya aktif pada *line* yang terhubung dengan STATCOM yang ini diperoleh dari sumber energi DC.

STATCOM juga memiliki keuntungan lain sebagai berikut.

1. Peralatan STATCOM sudah berupa modul, sehingga dapat mengurangi daerah kerja dan waktu *commissioning*.
2. STATCOM menggunakan konverter elektronik yang sudah terlindungi dengan baik, sehingga pengaruh lingkungan dapat berkurang.

STATCOM memiliki fungsi yang sama dengan mesin sinkron, yakni menghasilkan tegangan 3 fasa setimbang. Namun STATCOM tidak memiliki momen *inertia*, yang secara praktis lebih menguntungkan dibandingkan mesin sinkron serta biaya operasi dan perawatan yang lebih sedikit.

Pada tahun 1995 di Sullivan Substation, *The Tennessee Valley Authority* (TVA) menjadi tempat pertama kali pemasangan STATCOM dengan kapasitas ± 100 MVA. Aplikasi dari STATCOM ditujukan untuk mengurangi TVA dari kebutuhan *load tap changers*, sehingga mampu mengurangi kemungkinan rusaknya transformer. STATCOM juga memiliki kontrol yang lebih cepat terhadap tegangan transmisi dan juga meningkatkan keandalan sistem terhadap *osillation damping*.



Gambar 1.7 STATCOM yang Terhubung pada Sistem

Model Steady State

STATCOM terhubung paralel dengan sistem melalui *coupling magnetic*, yakni *coupling transformer*. STATCOM yang terhubung pada sistem terdiri dari VSC dengan peralatan *switch* model GTO atau IGBT, sebuah kapasitor C_s pada sisi DC sebagai penyimpan energi. Tahanan R_p paralel dengan C_s merepresentasikan rugi-rugi *switching* dan rugi kapasitor. STATCOM dihubungkan ke sistem AC melalui *magnetic coupling* yang diwakilkan oleh *leakage inductance* L_s dan tahanan R_s [14]. STATCOM akan meningkatkan performansi sistem tenaga, termasuk *dynamic compensation*, mencegah SSR (*Subsynchronous Resonance*) akibat dari modulasi daya reaktif pada titik *common-coupling* dan lain-lain.

Persamaan diferensial orde pertama pada rangkaian sisi AC dari STATCOM adalah sebagai berikut.

$$\frac{di_{sa}}{dt} = \frac{1}{L_s} (-R_s i_{sa} + e_{sa} - e_{ta}) \quad (3.1)$$

$$\frac{di_{sb}}{dt} = \frac{1}{L_s} (-R_s i_{sb} + e_{sb} - e_{tb}) \quad (3.2)$$

$$\frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_s} (-R_s i_{sc} + e_{sc} - e_{tc}) \quad (3.3)$$

Persamaan ini diubah dalam *referensi d-q frame* sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_0 \\ -\omega_0 & \frac{-R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} E_{sd} - E_{td} \\ E_{sq} - E_{tq} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Persamaan rangkaian STATCOM pada sisi DC dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{-1}{C_s} \left(I_{dc} + \frac{V_{dc}}{R_p} \right)$$

Daya sesaat pada terminal AC dan terminal DC dari *converter* adalah sama, dengan persamaan keseimbangan daya sebagai berikut.

$$V_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (E_{sd} I_{sd} + E_{sq} I_{sq}) \quad (3.6)$$

Konstanta 3/2 adalah konstanta dari transformasi *reference-frame* d-q. Mengacu pada diagram *phasor*, maka nilai dari E_{sd} dan E_{sq} dapat diperoleh sebagai berikut:

$$E_{sd} = E_s \cos \theta_s = K_{cs} V_{dc} \cos \theta_s \quad (3.7)$$

$$E_{sq} = E_s \sin \theta_s = K_{cs} V_{dc} \sin \theta_s \quad (3.8)$$

Nilai K_{cs} merupakan konstanta penghubung tegangan AC dan DC. Contohnya ialah pada VSC 12-pulsa nilai $K_{cs} = 2\sqrt{6} \pi$. Sehingga Persamaan 3.6 menjadi:

$$V_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (K_{cs} V_{dc} \cos \theta_s I_{sd} + K_{cs} V_{dc} \sin \theta_s I_{sq}) \quad (3.10)$$

Atau

$$I_{dc} = \frac{3}{2} \left(K_{cs} \cos \theta_s I_{sd} + K_{cs} \sin \theta_s I_{sq} \right) \quad (3.11)$$

Kemudian substitusi nilai I_{dc} ke Persamaan (3.5)

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{-1}{C_s} \left(\frac{3}{2} K_{cs} \cos \theta_s I_{sd} + \frac{3}{2} K_{cs} \sin \theta_s I_{sq} + \frac{V_{dc}}{R_p} \right) \quad (3.12)$$

Selanjutnya substitusi nilai E_{sd} dan E_{sq} dari Persamaan (3.7) dan (3.8) ke Persamaan (3.10):

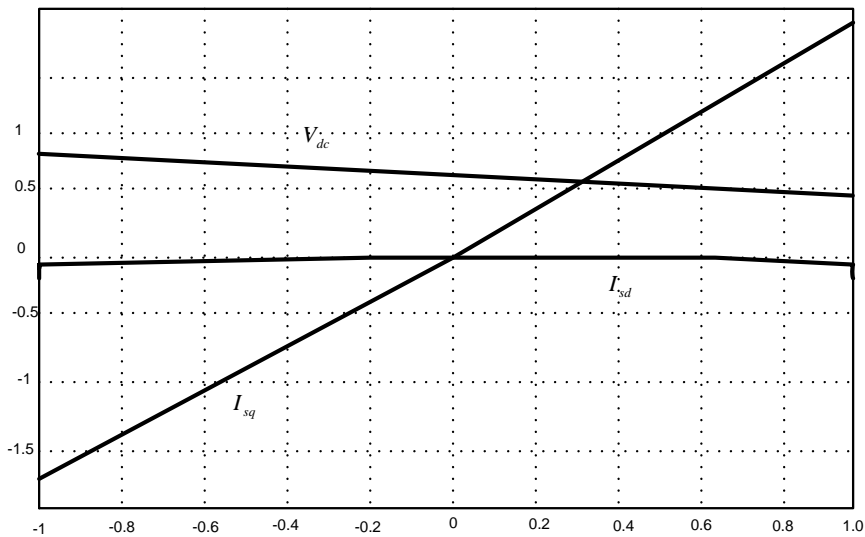
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_0 \\ -\omega_0 & \frac{-R_s}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} K_{cs} V_{dc} \cos \theta_s - E_{td} \\ K_{cs} V_{dc} \sin \theta_s - E_{tq} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Dari Persamaan (3.12) dan (3.13), maka diperoleh model *state space* untuk STATCOM, sehingga persamaannya dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{sd} \\ \dot{I}_{sq} \\ \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_0 & \frac{K_{cs} \cos \theta_s}{L_s} \\ \omega_0 & \frac{-R_s}{L_s} & \frac{K_{cs} \cos \theta_s}{L_s} \\ \frac{1.5 K_{cs} \cos \theta_s}{C_s} & \frac{1.5 K_{cs} \cos \theta_s}{C_s} & \frac{1}{R_p C_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{L_s} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{td} \\ E_{tq} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Penyelesaian *steady-state* dari rangkaian STATCOM menggunakan parameter $R_s = 0.01 pu$, $R_p = 128 pu$, $C_s = 0.013 pu$ dan $K_{cs} = 2\sqrt{6} \pi$ dapat digambarkan sebagai fungsi perbedaan sudut fasa θ_d . Dari gambar berikut, I_{sd} dan I_{sq} adalah komponen arus aktif dan reaktif dari STATCOM I_s . Arus reaktif keluaran STATCOM dikontrol oleh perubahan

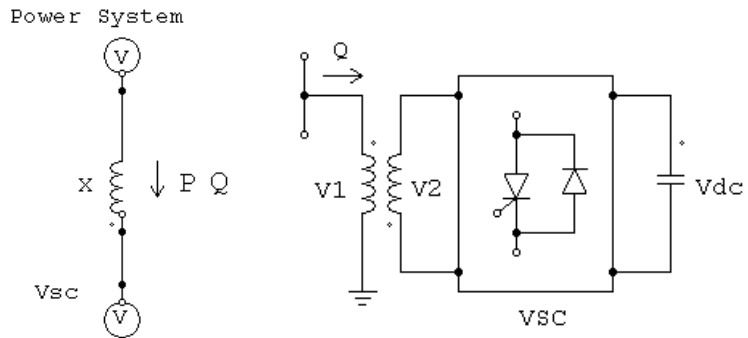
θ_d . Kita melihat, bahwa I_{sq} berubah hampir mendekati linear dengan θ_d dan range θ_d untuk mengontrol I_{sq} sekitar ± 1 pu.



Gambar 1.8 Karakteristik *Steady-State* STATCOM

Prinsip Kerja STATCOM

Prinsip kerja dari STATCOM dapat dijelaskan dengan gambar berikut, bahwa tegangan V_1 merupakan tegangan sistem yang akan dikontrol dan V_2 adalah tegangan yang dibangkitkan oleh STATCOM.



Gambar 1.9 Prinsip Kerja STATCOM

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} \quad (3.15)$$

$$Q = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta)}{X} \quad (3.16)$$

Keterangan:

- V_1 = tegangan sumber *line to line*
- V_2 = tegangan STATCOM *line to line*
- X = reaktansi dari trafo
- δ = sudut antara V_1 terhadap V_2

Pada keadaan operasi *steady state*, tegangan V_2 yang dibangkitkan VSC memiliki fasa yang sama dengan V_1 ($\delta=0$). Artinya, hanya daya reaktif yang mengalir ($P=0$). Jika V_2 lebih rendah dari V_1 , maka Q akan mengalir dari V_1 ke V_2 (STATCOM menyerap daya reaktif). Sebaliknya, jika V_2 lebih tinggi dibandingkan V_1 , Q akan mengalir dari V_2 ke V_1 (STATCOM akan membangkitkan daya reaktif). Jumlah dari daya reaktif yang diberikan adalah sebagai berikut.

$$Q = \frac{V_1(V_1 - V_2)}{X} \quad (3.17)$$

Sebuah kapasitor terhubung pada sisi DC dari VSC yang berfungsi sebagai sumber tegangan DC. Pada kondisi *steady state*, tegangan V_2 hampir sefasa dengan V_1 untuk mengkompensasi rugi pada trafo dan VSC, dan juga menjaga pengisian kapasitor.

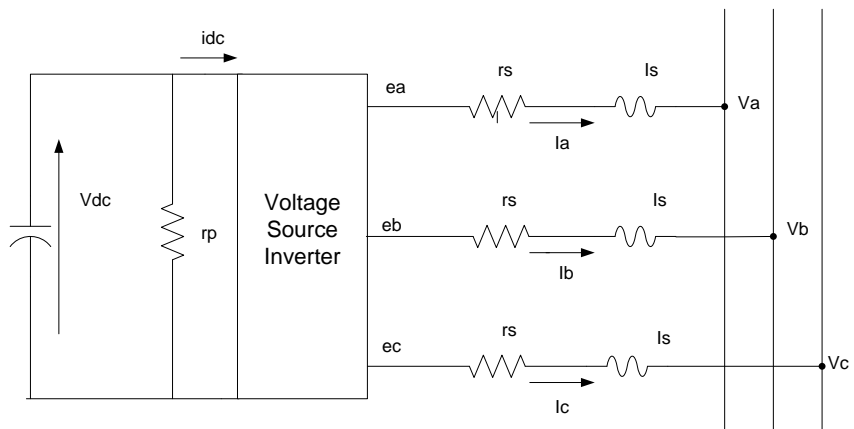
Single-Line Diagram dari STATCOM dan Diagram Sistem Kontrol

Sistem kontrol dari STATCOM terdiri dari beberapa bagian sebagai berikut.

1. *Phase-locked loop* (PLL) yang akan menyinkronkan komponen *positive sequence* dari tegangan tiga fasa V_1 . Keluaran dari PLL (sudut $\theta = \omega t$) berfungsi untuk menghitung komponen *direct-axis* dan *quadrature-axis* dari arus dan tegangan AC tiga fasa (dituliskan sebagai I_d, I_q, V_d, V_q pada diagram)
2. Hasil pengukuran untuk komponen d dan q dari arus dan tegangan AC akan dikontrol begitu juga dengan tegangan V_{dc} .
3. *Loop* regulasi bagian luar terdiri atas regulator tegangan AC dan regulator tegangan DC. Keluaran dari tegangan regulator AC ialah arus referensi I_{qref} untuk regulator arus ($I_q =$ arus pada tegangan *quadrature* yang mengontrol aliran daya reaktif). Sementara untuk keluaran dari tegangan regulator DC ialah arus referensi I_{dref} untuk arus regulator ($I_d =$ arus yang sefasa dengan tegangan yang mengontrol aliran daya aktif).
4. *Loop* regulasi arus sebelah dalam terdiri dari sebuah regulator arus yang akan mengontrol magnitude dan fasa dari tegangan yang dibangkitkan PWM konverter (V_{2d}, V_{2q}) dari arus referensi I_{qref} dan I_{dref} hasil dari regulator tegangan AC dan regulator tegangan DC). Regulator arus sangat membantu untuk memprediksi tegangan keluaran dari V_2 (V_{2d}, V_{2q}) dari pengukuran V_1 (V_{1d}, V_{1q}) dan reaktansi bocor trafo.

Pemodelan *State Space* STATCOM

Berdasarkan rangkaian ekuivalen STATCOM pada Gambar 3.4, tahanan r_s seri dengan induktansi bocor dari trafo l_s . Tahanan r_p terhubung paralel dengan kapasitor, yang mewakili jumlah dari *losses* akibat proses *switch* dari *inverter* dan rugi (*losses*) pada *capasitor*. Tegangan e_a , e_b dan e_c merupakan tegangan pada sisi AC *inverter*.



Gambar 1.10 *Static Synchronous Compensator*

Persamaan dari rangkaian di atas dapat ditulis dalam bentuk vektor sebagai berikut.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_{abc} = -\frac{r_s}{l_s} \mathbf{i}_{abc} + \frac{1}{l_s} (\mathbf{e}_{abc} - \mathbf{v}_{abc}) \quad (3.18)$$

Tegangan bus pada fasa a dapat dituliskan sebagai berikut.

$$v_a = \sqrt{2} V_s \cos(\omega_s t + \theta_s) \quad (3.19)$$

Keterangan:

V_s adalah tegangan pada bus

θ_s adalah sudut fasa

Tegangan keluaran dari STATCOM (dengan mengabaikan harmonisa) dituliskan sebagai berikut.

$$e_a = kV_{dc} \cos(\omega t + \alpha) \quad (3.20)$$

Keterangan:

V_{dc} adalah tegangan pada sisi DC

α adalah sudut fasa dari tegangan

k adalah faktor yang berhubungan dengan tegangan DC dan puncak dari tegangan pada sisi AC

Dengan mentransformasikan sistem ke bentuk *synchronous referensi* (sumbu $d-q$), maka diperoleh model sebagai berikut.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} = A_{Statcom} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{dc} \end{bmatrix} - \frac{\omega_s}{L_s} \begin{bmatrix} V_s \cos \theta \\ V_s \sin \theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

Kemudian

$$A_{Statcom} = \begin{bmatrix} \frac{-R\omega_s}{L_s} & \omega_s & \frac{\omega_s k}{L_s} \cos(\alpha + \theta) \\ -\omega_s & \frac{-R\omega_s}{L_s} & \frac{\omega_s k}{L_s} \sin(\alpha + \theta) \\ M_k \cos(\alpha + \theta) & M_k \sin(\alpha + \theta) & \frac{-C\omega_s}{R_p} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

dan

$$M_k = \frac{3}{2} k \omega_s C \quad (3.23)$$

Perlu dipahami, bahwa meskipun persamaan (3.22) kelihatan linear, namun sesungguhnya persamaan tersebut adalah nonlinear. Ketidaklinearan STATCOM dimanifestasikan oleh persamaan keadaan untuk kontrol sudut α . Perubahan pada kontrol sudut α akan

menghasilkan respons yang tidak linear dari *state* STATCOM yakni i_d , i_q dan V_{dc} .

Injeksi daya aktif dan reaktif oleh STATCOM pada bus, dirumuskan sebagai berikut.

$$P = V_s (\cos \theta i_d + \sin \theta i_q) \quad (3.24)$$

$$Q = V_s (\sin \theta i_d - \cos \theta i_q) \quad (3.25)$$

Persamaan karakteristik dari persamaan (3.22) yang telah dilinearkan adalah sebagai berikut.

$$s^3 + s^2 \left\{ \frac{2R_s \omega_s}{L_s} + \frac{\omega_s C}{R_p} \right\} + s \left\{ \frac{R \omega_s}{L_s} \left(\frac{R \omega_s}{L_s} + \frac{2\omega_s C}{R_p} \right) + \omega^2 + \frac{3k^2 \omega^2 C}{2L} \right\} + \left\{ \frac{\omega_s^3 C}{R_p} \left(1 + \frac{R_s^2}{L_s^2} \right) + \dots \right\} + \frac{3k^2 \omega^3 C R_s}{2L_s^2} \quad (3.26)$$

Dari persamaan (3.26), kita ketahui bahwa nilai *eigen* (akar dari persamaan (3.26)) kebebasan dari kontrol sudut α . Artinya, kestabilan dari STATCOM ialah terpisah dari kontrol yang akan diberikan.

Parameter STATCOM (dalam pu) yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$L_s = 0.15, \quad C = 0.88, \quad k = \frac{4}{\pi}$$

$$R_s = 0.01, \quad R_p = \frac{100}{k}, \quad \omega_b = 377.0$$

Dengan parameter tersebut, maka diperoleh nilai *eigen* dari sistem yang telah dilinearkan sebagai berikut.

$$s = -23.8, \quad -15.4 \pm j1473.0$$

Dari nilai ini menunjukkan, bahwa STATCOM sangat teredam kuat dan stabil pada kondisi operasinya. Nilai *eigen* yang kompleks menunjukkan adanya osilasi frekuensi tinggi pada respons dinamik dari STATCOM.

Pada kondisi *steady state*, STATCOM sebagai fungsi dari kontrol sudut α menunjukkan, bahwa grafik dari sistem adalah nonlinear. Namun demikian, komponen arus i_q hampir linear terhadap α . Sementara daya reaktif disuplai dari STATCOM tergantung pada nilai i_d (i_d arus yang menyuplai daya aktif yang merupakan *losses*). Daya reaktif disuplai oleh STATCOM berubah-ubah bergantung sudut α . Artinya, tegangan pada bus yang terhubung dengan STATCOM tergantung linear dari kontrol sudut α . Metode kontrol linear akan memberikan hasil yang baik ketika terjadi gangguan, meskipun STATCOM dan sistem tenaga adalah sistem yang tidak linear. Ketidaklinearan dari sistem tenaga dimodelkan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, z) \\ \dot{y} &= g(y, z) \\ 0 &= h(x, y, z)\end{aligned}$$

Notasi x adalah *state* generator (seperti sudut roto generator dan kecepatan, tegangan dalam sumbu dq , eksitasi dan lain-lain). *State* y mewakili *state* dari STATCOM, sedangkan z mewakili magnitudo tegangan dan sudut pada bus sistem. Persamaan (3.24) dan (3.25) merupakan batas dari aliran daya reaktif dan aktif dari sistem yang mengalir pada jaring. *State* generator dan STATCOM digabungkan hanya dengan persamaan aljabar jaring.

Sistem ini dapat dilinearkan pada titik operasinya sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{gen} & 0 & B_{xz} \\ 0 & A_{stat} & B_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E \\ 0 \end{bmatrix} \alpha \quad (3.27)$$

Keterangan:

E untuk setiap STATCOM adalah:

$$E_i = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_s k_i}{L_s} \sin(\alpha_i + \theta_i) V_{dci} \\ -\frac{\omega_s k_i}{L_s} \cos(\alpha_i + \theta_i) V_{dci} \\ \frac{3}{2} k_i \omega_s C_i' \sin(\alpha_i + \theta_i) i_{di} - \cos(\alpha_i + \theta_i) i_{qi} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Dengan menggunakan asumsi bahwa persamaan jaring dapat diselesaikan, kemudian orde persamaan dari sistem dapat dikurangi, maka diperoleh:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} \\ A_{yx} & A_{yy} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E \end{bmatrix} \alpha \quad (3.29)$$

Keterangan:

$$A_{xx} = A_{gen} - B_{xz} D^{-1} C_{zx} \quad A_{xy} = -B_{xz} D^{-1} C_{zy}$$

$$A_{yy} = A_{stat} - B_{yz} D^{-1} C_{zy} \quad A_{yx} = -B_{yz} D^{-1} C_{zx}$$

Kontrol STATCOM

Linearisasi Persamaan (3.29) dapat digunakan untuk mendesain dan membandingkan bermacam-macam *state* dari pengontrolan *feedback* dalam bentuk:

$$y_i = -K_{FB} \alpha_i \quad (3.30)$$

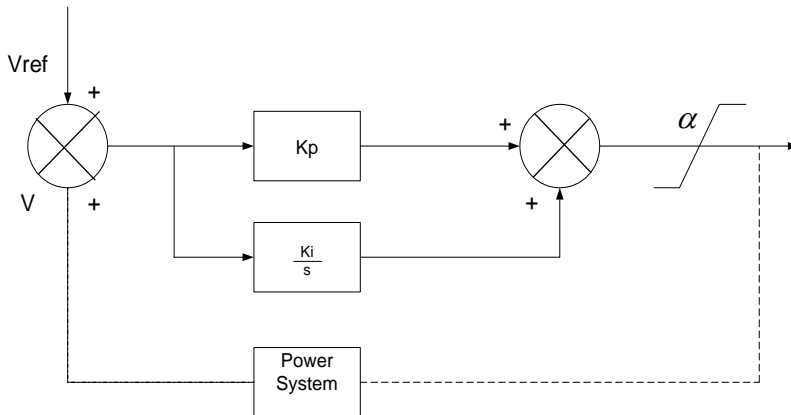
Sehingga persamaan control sistem menjadi:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{xx} & A_{xy} \\ A_{yx} & A_{yy} - EK_{FB} \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

State feedback control sering digunakan pada studi pengontrolan sistem tenaga.

Proportional-Integral (PI) Control

Dalam implementasinya, pengontrolan PI digunakan untuk mengontrol respons tegangan pada Statcom[5],[2]. Blok diagram dari sistem control ini dapat ditunjukkan melalui gambar berikut.



Gambar 1.11 Blok Diagram Kontrol STATCOM dengan PI Controller

Gain K_p dan K_i secara berturut-turut merupakan penguatan *proportional* dan *integral*. Sudut α_{\min} dan α_{\max} ialah batas dari nilai sudut control, yang mempertimbangkan kapasitas daya reaktif maksimum dan dapat dibangkitkan oleh STATCOM.

Kontrol PI direpresentasikan oleh bentuk dari *state feedback*. Contohnya, diperoleh nilai kesalahan dari *state* ω adalah sebagai berikut.

$$\dot{\omega} = (V_s - V_{ref}) \quad (3.32)$$

Sedangkan nilai dari kontrol α :

$$\alpha = K_p (V_s - V_{ref}) + K_i \omega + \alpha_0 \quad (3.33)$$

Sehingga diperoleh tegangan pada bus STATCOM adalah:

$$V_s = C_{sys} D^{-1} [C_{zx} \ C_{zy}] \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Vektor C_{sys} adalah vektor *zero*, pengecualian nilai 1 pada posisi yang berhubungan dengan magnitudo tegangan bus STATCOM. Dengan mengabaikan *vector* y dengan ω , *state feedback* control PI menjadi sebagai berikut.

$$K_{FB} = (K_i Q_{sys} - K_p C_{sys} D^{-1} C_{sys}) \quad (3.35)$$

Q_{sys} adalah *vector zero*, dengan nilai 1 pada posisi integrator *state* ω .

Metode Penggeseran Pole

Respons dinamik sebuah sistem linear dihasilkan oleh besar dan lokasi nilai *eigen* atau *pole*. Hal ini dipengaruhi oleh bagaimana kita menempatkan ulang beberapa atau semua dari *pole* sistem.

Sistem Umpan Balik Optimal *Linear Quadratic Gaussian*

Pemulaan sistem kontrol disusun berdasarkan kawasan frekuensi kemudian kawasan waktu. Di dalam dua kawasan ini, konsep stabilitas sistem banyak mendapat kemajuan. Contohnya adalah konsep kestabilan Lyapunov pada tahun 1890, Routh dan Hurwitz pada tahun 1877, dan Nyquist pada tahun 1932. Pada saat itu rancangan kontroler dan filter sudah mulai berkembang, namun dilakukan secara terpisah [3].

Awal pengenalan konsep optimalitas dalam teori sistem dilakukan Wiener [4]. Ia mengenalkan estimator linier yang optimal pada tahun 1942. Hasil ini secara matematik sangat baik, namun sulit untuk direalisasikan secara praktis. Karena itulah dilakukan upaya manipulasi estimator Wiener dengan mengambil bagian yang dapat direalisasikan. Namun cara ini akan dapat mengurangi bobot estimator Wiener.

Pendekatan ruang yang dilakukan Kalman dan Gilbert di sekitar tahun 1960 menjadi titik awal analisis proses-proses linear multi variabel, yang mana setelah ini dikenal konsep optimalitas sistem multivariabel

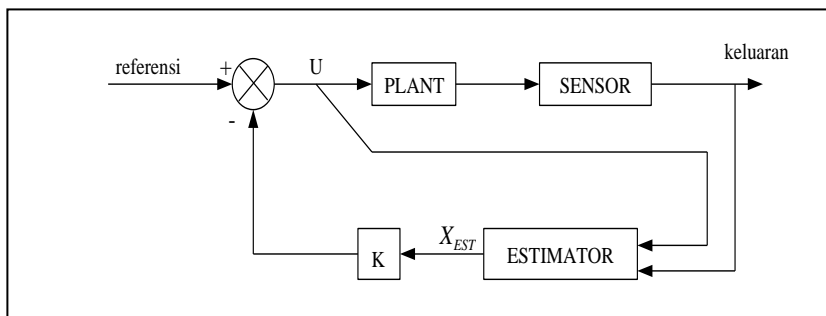
berdasarkan indeks kinerja kuadratis untuk kasus-kasus deterministik yang disebut LQR (*Linear Quadratic Regulator*). Dalam perjalanannya, konsep LQR mengalami pengembangan, dengan mengikutsertakan estimator optimal (filter Kalman). Konsep ini diperkenalkan pada tahun 1970 dengan nama LQG (*Linear Quadratic Gaussian*) yang selanjutnya dikenal dengan teorema pemisahan oleh Anderson dan Moore [5]. Dari hasil ini penguatan umpan balik dan filter dalam LQG dapat dirancang secara terpisah. Penerapan umpan balik optimal dapat dinyatakan berupa diagram blok sebagai berikut.

U : Sinyal kontrol

X_{est} : Variabel estimasi

K : penguatan umpan balik

K_f : penguatan filter kalman (terletak di dalam estimator)



Gambar 1.12 Diagram Blok Sistem Kontrol

Gambar di atas menunjukkan, bahwa untuk mencari sinyal kontrol optimal u^0 diperlukan penguat kontroler K dan penguat estimator Kalman K_f yang optimal [6]. Agar sistem tetap stabil, diperlukan kontroler dan estimator yang stabil. Menurut teorema pemisahan, untuk memperoleh harga K dan K_f bisa dilakukan secara terpisah. Dalam hal ini, seolah-olah sistem bersifat deterministik, yaitu dengan metode LQR sedangkan untuk mencari harga K_f optimal dilakukan dengan sistem stokastik yaitu indeks kinerja variansi kesalahan minimum.

Kontrol *Linear Quadratic Regulator* (LQR)

Secara umum, sistem kontrol dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \quad (3.36)$$

dengan,

\mathbf{x} = *state vector*

\mathbf{u} = vektor kontrol

\mathbf{A} = $n \times n$ matriks konstan

\mathbf{B} = $n \times r$ matriks konstan

Dalam desain sebuah kontrol sistem, umumnya vektor $\mathbf{u}(t)$ dipilih sehingga indeks performansi yang diberikan dapat diminimalisasi. Hubungan hukum kontrol linear yang diperoleh adalah sebagai berikut.

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{Kx}(t) \quad (3.37)$$

dengan \mathbf{K} merupakan matriks $r \times n$.

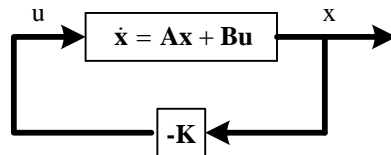
Maka dari itu, desain sistem kontrol optimal dan sistem optimal regulator yang berdasarkan pada indeks performansi kuadrat mengacu pada penentuan elemen matriks \mathbf{K} .

Selanjutnya ialah penentuan vektor kontrol optimal $\mathbf{u}(t)$ untuk sistem yang dapat dituliskan sebagai berikut:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^t \mathbf{Qx} + \mathbf{u}^t \mathbf{Ru}) dt \quad (3.38)$$

\mathbf{Q} adalah *positive-definite Hermitian* atau matriks simetris real, sedangkan \mathbf{R} adalah *positive-definite Hermitian* atau matriks simetris real. Perlu dipahami bahwa istilah kedua pada sisi kanan Persamaan (3.38) memperhitungkan biaya energi sinyal kontrol. Matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} menentukan kesalahan relatif dan biaya energi tersebut. Dalam hal ini, kita menggunakan asumsi bahwa vektor kontrol $\mathbf{u}(t)$ tidak berubah. Sistem kontrol optimal akan meminimalisasi indeks performansi. Sistem tersebut akan stabil.

Hukum kontrol linear dalam Persamaan (3.38) merupakan hukum kontrol optimal. Elemen yang tidak diketahui pada matriks K akan ditentukan untuk meminimalisasi indeks performansi sistem, dan $u(t) = -Kx(t)$ akan optimal untuk setiap kondisi inisial $x(0)$. Blok diagram yang menggambarkan konfigurasi optimal ditunjukkan pada Gambar 3.6 sebagai berikut.



Gambar 1.13 Sistem Kontrol Optimal

Dengan menyubstitusi Persamaan (3.38) dengan (3.37), maka akan diperoleh sebagai berikut.

$$\dot{x} = Ax - BKx = (A - BK)x \quad (3.39)$$

Pada penurunan berikutnya diasumsikan bahwa matriks $A - BK$ stabil, atau nilai *eigen* $A - BK$ adalah negatif.

Dengan menyubstitusi persamaan (3.47) dengan (3.48), maka dihasilkan persamaan sebagai berikut.

$$J = \int_0^{\infty} (x^*Qx + x^*K^*RKx)dt \quad (3.40)$$

$$= \int_0^{\infty} x^*(Q + K^*RK)xdt \quad (3.41)$$

Persamaan berikut ini akan memberikan pemecahan pada masalah parameter optimasi,

$$x^*(Q + K^*RK)x = -\frac{d}{dt} (x^*Px) \quad (3.42)$$

dengan P adalah *positive-definite Hermitian* atau matriks real simetri. Kemudian:

$$x^*(Q + K^*RK)x = -x^*Px - x^*Px \quad (3.43)$$

$$= -x^*[(A - BK)^*P + P(A - BK)]x \quad (3.44)$$

Dengan membandingkan kedua sisi pada persamaan terakhir, maka

$$(A - BK)^*P + P(A - BK) = -(Q + K^*RK) \quad (3.45)$$

Apabila $A - BK$ merupakan matriks stabil, maka akan terdapat matriks P positif yang akan memenuhi Persamaan (3.45).

Untuk memenuhi solusi permasalahan kontrol optimal kuadratik, maka perlu dilakukan langkah-langkah sebagai berikut (nilai R diasumsikan sebagai matriks simetris real).

$$R = T^*T \quad (3.46)$$

T adalah matriks non singular, sehingga Persamaan (3.45) dapat ditulis sebagai berikut.

$$(A^* - K^*B^*)P + P(A - BK) + Q + K^*T^*TK = 0 \quad (3.47)$$

Kemudian dapat ditulis kembali sebagai:

$$A^*P + PA + [TK - (T^*)^{-1}B^*P]^*[TK - (T^*)^{-1}B^*P] - PBR^{-1}B^*P + Q = 0 \quad (3.48)$$

Minimalisasi J terhadap K membutuhkan minimalisasi Persamaan (3.50) terhadap K .

$$x^*[TK - (T^*)^{-1}B^*P]^*[TK - (T^*)^{-1}B^*P]x \quad (3.49)$$

Karena persamaan terakhir tidak negatif, maka nilai minimum akan terjadi apabila,

$$TK = (T^*)^{-1}B^*P \quad (3.50)$$

sedangkan,

$$K = T^{-1}(T^*)^{-1}B^*P = R^{-1}B^*P \quad (3.51)$$

Persamaan (3.51) memberikan matriks K optimal. Artinya, hukum kontrol optimal pada permasalahan kontrol optimal kuadratik jika indeks performansi diberikan pada persamaan (3.55) adalah linear, sehingga persamaannya menjadi:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^*\mathbf{P}\mathbf{x}(t) \quad (3.52)$$

Matriks \mathbf{P} pada persamaan (3.51) harus memenuhi persamaan (3.48) atau persamaan reduksi berikut ini:

$$\mathbf{A}^*\mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^*\mathbf{P} + \mathbf{Q} = \mathbf{0} \quad (3.53)$$

Persamaan (3.53) disebut persamaan matriks Ricatti tereduksi. Langkah-langkah desain dapat dituliskan sebagai berikut:

1. Menyelesaikan Persamaan (3.53), persamaan matriks Ricatti tereduksi, untuk matriks \mathbf{P} .
2. Melakukan substitusi matriks \mathbf{P} ke Persamaan (3.51). Hasil matriks \mathbf{K} adalah matriks optimal.

Filter Kalman

Filter Kalman merupakan estimator optimal untuk mengestimasi keadaan, sekaligus untuk menyaring derau. Prinsip kerja estimator didasarkan pada sifat rekursif. Optimasi yang dilakukan ialah dengan menekan harga kovarian kesalahannya sekecil mungkin, sehingga indeks kinerjanya adalah sebagai berikut.

$$J = E\{[\hat{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{x}(t)]^T [\hat{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{x}(t)]\} \quad (3.54)$$

$\hat{\mathbf{x}}(t)$ adalah estimasi $\mathbf{x}(t)$ dalam waktu t .

sistem ruang keadaannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \Gamma\mathbf{w}(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (3.55)$$

persamaan pengukuran,

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{V}(t) \quad (3.56)$$

Dengan,

$\mathbf{x}(t)$: vektor variabel keadaan,

$u(t)$: vektor masukan (variabel kontrol),
 $y(t)$: vektor pengukuran,
 $v(t)$: vektor gangguan pada pengukuran

Dengan asumsi bahwa,

$$\begin{aligned}
 E[v(t)v^T(\tau)] &= V(t)\delta(t-\tau), \quad E[v(t)] = 0 \\
 E[w(t)w^T(\tau)] &= W(t)\delta(t-\tau), \quad E[w(t)] = 0 \\
 E[v(t)w^T(\tau)] &= 0 \\
 E[x(t_0)] &= x_0
 \end{aligned}$$

W: kovarian derau putih pada proses, $W \geq 0$ dan simetri

V: kovarian derau putih pada pengukuran $V > 0$ dan simetri

Solusi Permasalahan Keadaan Mantap

Melalui asumsi bahwa harga kovarian keadaan sistem akan menuju satu titik pada keadaan mantap, maka persamaan aljabar Riccati masih berlaku. Estimasi keadaan optimal $\hat{x}(t)$ diperoleh dari sistem dinamik filter Kalman.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K_f(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (3.57)$$

Dengan penguatan filter $K_f = PC^T V^{-1}$, maka matriks P diperoleh dari persamaan Riccati.

$$\dot{P} = PA^T + AP - PC^T V^{-1}CP + \Gamma W \Gamma^T \quad (3.58)$$

Pada kondisi keadaan mantap persamaan (2-21) menjadi:

$$0 = PA^T + AP - PC^T V^{-1}CP + \Gamma W \Gamma^T \quad (3.59)$$

$$P \geq 0.$$

Dengan asumsi-asumsi A dan B terkontrol, dan C teramati $W \geq 0$, $V \geq 0$, maka filter kalman dijamin stabil asimtotik. Dari bahasan inilah kita bisa susun dalam bentuk Tabel 4.2 berikut.

Tabel 1.1 Persamaan Filter Kalman

Model sistem

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Gamma w$$

$$z = Cx + v$$

$$x(0) = (x_0, P_0), w = (0, W), v = (0, V)$$

Asumsi

$w(t)$ dan $v(t)$ adalah derau putih yang tidak berkorelasi, $V > 0$

Inisial

$$P(0) = P_0, x(0) = x_0$$

Kovarian *error*

$$\dot{P} = PA^T + AP - PC^T V^{-1} CP + \Gamma W \Gamma^T$$

Penguatan Kalman

$$K_f = PC^T V^{-1}$$

Estimasi

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + K_f (y(t) - C\hat{x}(t))$$

Linear Quadratic Gaussian (LQG)

Sistem stokastik linear invarian waktu memiliki persamaan dinamik seperti persamaan (2-17) dan (2-18). Indeks kinerja kuadratik untuk sistem stokastik ini diberikan oleh persamaan:

$$J(t_0) = E \left[\frac{1}{2} x^T(T) S(T) x(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T \{x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)\} dt \right] \quad (3.60)$$

dengan $S(T) \geq 0, Q \geq 0$ dan $R > 0$.

Dengan $x^T S x = \Phi(x, t)$

$$\frac{d}{dt} E[\Phi(x, t)] = \frac{d}{dt} \int \Phi(x, t) f_x(x) dx$$

$$\begin{aligned}
&= \int \left[\frac{\partial \Phi(x,t)}{\partial t} f_2(x) + \Phi(x,t) \frac{\partial f_2(x)}{\partial t} \right] dx \\
&= E \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right] + \int \Phi(x,t) \frac{\partial f_2(x)}{\partial t} dx \\
&= E(\Phi_t) + E \left[\Phi_x^T (Ax + Bu) \right] + \frac{1}{2} \text{trace} E(\Gamma W \Gamma^T \Phi_{xx}) \\
&= E(x^T \dot{S}x) + 2E \left[x^T S(Ax + Bu) \right] + \text{trace} E(\Gamma W \Gamma^T S) \\
&= E(x^T \dot{S}x) + E \left[x^T S(Ax + Bu) + (Ax + Bu)^T Sx \right] + \\
&\quad \text{trace} E(\Gamma W \Gamma^T S) \tag{3.61}
\end{aligned}$$

Dari persamaan Identitas,

$$\frac{1}{2} \int \frac{d}{dt} E(x^T Sx) dt = \frac{1}{2} E[x^T(T)S(T)x(T)] - \frac{1}{2} E[x^T(t_0)S(t_0)x(t_0)] \tag{3.62}$$

substitusi persamaan (2-22),(2-23) dan(2-24), maka dihasilkan,

$$\begin{aligned}
j(t_0) &= \frac{1}{2} E[x^T(t_0)S(t_0)x(t_0)] + \frac{1}{2} E \int_{t_0}^T [x^T(\dot{S} + A^T S + SA + Q)x + x^T S B u \\
&\quad + u^T B^T Sx + u^T R u] dt + \frac{1}{2} \text{trace} \int_{t_0}^T S \Gamma W \Gamma^T dt \tag{3.63}
\end{aligned}$$

dari persamaan Riccati,

$$\dot{S} + A^T S + SA + SA + Q = SBR^{-1}B^T S \tag{3.64}$$

maka persamaan (4-25) dapat di tulis,

$$\begin{aligned}
j(t_0) &= \frac{1}{2} E[x^T(t_0)S(t_0)x(t_0)] + \frac{1}{2} E \int_{t_0}^T [x^T(SBR^{-1}B^T S)x \\
&\quad + x^T S B u + u^T B^T Sx + u^T R u] dt + \frac{1}{2} \text{trace} \int_{t_0}^T S \Gamma W \Gamma^T dt \tag{3.65}
\end{aligned}$$

Integrasi pertama diselesaikan dengan *norm* [McReynold,1966], sehingga persamaan (2-27) dapat ditulis menjadi,

$$j(t_0) = \frac{1}{2} E[x^T(t_0)S(t_0)x(t_0)] + \frac{1}{2} E \int_{t_0}^T \|R^{-1}B^T Sx + u\|_R^2 dt + \frac{1}{2} \text{trace} \int_{t_0}^T S \Gamma W \Gamma^T dt \quad (3.66)$$

dari persamaan (2-28) maka terlihat bahwa untuk mencari harga $j(t_0)$ minimum dibutuhkan,

$$u^\circ = -R^{-1}B^T S(t)x(t) \\ u^\circ = K(t)x(t) \quad (3.67)$$

u° : sinyal umpan optimal LQG

Kestabilan sistem umpan balik LQG ini ditentukan oleh nilai *eigen* $A-BR^T P$ dan $A-SCTV^{-1}C$.

Teori Pemisahan

Indeks performansi minimal pada sistem stokastik sehingga diperoleh pengumpan umpan balik optimal K dan penguat umpan balik optimal K_f dapat dilakukan secara terpisah. Konsep ini dikenal dengan teori pemisahan. Estimasi optimal untuk input $u(t)$ diberikan oleh persamaan filter Kalman sebagai berikut.

$$\dot{P} = AP + PA^T + \Gamma W \Gamma^T - PC^T V^{-1} CP, t \geq t_0, P(t_0) = P_0 \\ K_f = PC^T V^{-1} \\ \dot{\hat{x}} = A \hat{x}(t) + Bu(t) + K_f(y(t) - C \hat{x}(t))$$

$P(t)$ adalah kovarian kesalahan, K_f adalah penguatan filter kalman, dan $\dot{\hat{x}}$ adalah estimasi keadaan.

Apabila didefinisikan set data yang ada pada waktu t adalah,

$$Z_t = \{z(\tau) / t_0 \leq \tau \leq t\}$$

Maka,

$$\frac{1}{2} E \int_{t_0}^T \|R^{-1}B^T Sx + u\|_R^2 dt = \frac{1}{2} E_{Z_t} \int_{t_0}^T E[(u + Kx)^T R(u + Kx) / Z_t] dt \quad (3.68)$$

E_{Z_t} : notasi ekspektasi dari Z_t

Jika random x mempunyai rata-rata \bar{x} dan kovarian P_x maka,

$$\begin{aligned} E(x^T R_x) &= E(x - \bar{x})^T R(x - \bar{x}) + (\bar{x})^T R \bar{x} \\ &= (\bar{x})^T R \bar{x} + \text{trace} [R(x - \bar{x})(x - \bar{x})^T] \\ &= (\bar{x})^T R \bar{x} + \text{trace} (R P_x) \end{aligned} \quad (3.69)$$

Dengan persamaan (2-30), maka persamaan (2-31) dapat ditulis menjadi,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} E \int_{t_0}^T \|R^{-1} B^T Sx + u\|_R^2 dt &= \frac{1}{2} E_{Z_t} \int_{t_0}^T E[(u + K\hat{x})^T R(u + K\hat{x})] dt \\ &+ \frac{1}{2} \text{trace} \int_{t_0}^T (K^T R K P) dt \end{aligned} \quad (3.70)$$

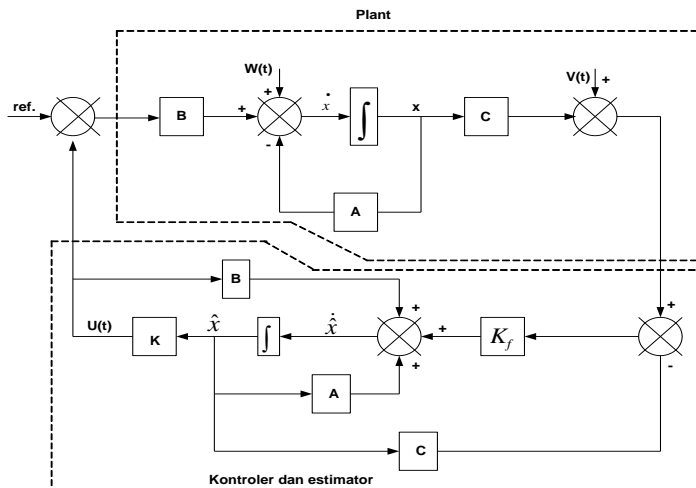
Dari persamaan (2-32) terlihat bahwa untuk mencapai harga minimum jika harga,

$$u(t) = -K(t) \hat{x}(t) \quad (3.71)$$

Persamaan (2-33) merupakan persamaan sinyal kontrol optimal yang untuk selanjutnya dapat ditulis menjadi,

$$u^o(t) = -K(t) \hat{x}(t) \quad (3.72)$$

Persamaan (2-33) dan (2-34) menunjukkan, bahwa harga $K(t)$ maupun $\hat{x}(t)$ dapat dicari secara terpisah. Sistem umpan balik LQG dalam bentuk diagram blok dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1.14 Sistem Umpan Balik LQG

Penentuan Matriks Pembobot

Matriks pembobot pada indeks kinerja digunakan untuk menentukan sifat kinerja desain kontrol. Sudah banyak metode untuk menilai besarnya matriks pembobot Q dan R . Di sini akan disuguhkan beberapa cara yang dapat dilakukan.

Metode *Try and Error*

Metode ini merupakan metode yang sangat sederhana dan praktis. Metode ini diaplikasikan dengan cara memilih komponen matriks secara coba-coba sesuai dengan keluaran yang diinginkan relatif terhadap keluaran sebelumnya.

Metode ini memiliki harga matriks yang berulang-ulang. Namun karena perkembangan komputer digital sudah mampu mengatasi perhitungan yang rumit atau berulang-ulang, kita dapat mengantisipasinya dengan cara melihat respons keluaran sistem terhadap perubahan matriks pembobot. Terdapat dua kaidah yang bermanfaat dalam penentuan matriks pembobot sehingga mendekati harga yang diinginkan.

1. Harga matriks pembobot Q dipilih harga yang besar, sehingga akan menyebabkan penguatan umpan balik membesar.
2. Apabila matriks pembobot R dipilih harga yang besar, maka penguatan kontrol umpan balik K mengecil sehingga tanggapan sistem menjadi lebih lamban.

Dengan mengetahui permodelan dari sistem, maka kita akan memperoleh persamaan *state space*, termasuk parameter sistem (A), variabel keadaan sistem $X(t)$ dan parameter masukan (B). Setelah itu, langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut.

- i. Memilih nilai matriks Q dan R secara coba-coba.
- ii. Menyelesaikan persamaan Ricati.

$$A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q = 0$$

- iii. Jika respons dan keluaran sistem tidak optimal, masukkan nilai Q dan R seperti langkah (i) sampai diperoleh respons waktu keluaran yang diinginkan dengan indeks kinerja/penampilan yang minimal.

Metode Bryson [3]

Asumsi bahwa matriks pembobot $Q \in \mathcal{R}^{n \times n}$ dan $R \in \mathcal{R}^{m \times m}$ adalah diagonal.

$$Q = \text{diag} \{q_1, \dots, q_n\}, R = \text{diag} \{r_1, \dots, r_m\}$$

q_1, \dots, q_n : komponen diagonal matriks Q

r_1, \dots, r_m : komponen matriks diagonal R

Algoritma,

- (i) menentukan deviasi maksimal yang diizinkan

$$x_i(\text{maks}), i = 1, \dots, n$$

$$u_j(\text{maks}), j = 1, \dots, m$$

- (ii) Menentukan komponen matriks pembobot

$$q_i = \frac{1}{x_i^2(\text{maks})} \quad \Bigg]_{i=1}^n \quad (3.73)$$

$$r_i = \frac{1}{u_1^2(\text{maks})} \Bigg]_{j=1}^m \quad (3.74)$$

Metode Eksak [3]

Metode ini dikembangkan dari metode pemindahan *pole* dengan cara menentukan nilai *eigen* sistem lingkaran tertutup.

Algoritma,

Inisialisasi, $Q = Q_0, K = K_0, K = \text{indeks iterasi} = 0, R > 0$

(i) Memperbaiki matriks sistem

$$A_k = A - B K \quad (3.75)$$

(ii) Menghitung nilai *eigen*/vektor *eigen*

$$A_k = \mathbf{diag} \{ \lambda_1, \dots, \lambda_n \}$$

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$: nilai *eigen*

$$T_k = [t_1, \dots, t_n], \in \mathfrak{R}^{n \times n}$$

t_1, \dots, t_n : vektor *eigen*

dan

$$H = T_k^{-1} B R^{-1} B^T [T_k^{-1}]^T \quad (3.76)$$

(iii) $k = k + 1$

(iv) menggeser λ_i ke lokasi s_i

$$\bar{q}_i^k = \frac{s_i^2 - \lambda_i^k}{h_{ii}^{k-1}} \quad (3.77)$$

h_{ii} : harga komponen diagonal matriks H

(v) $\bar{Q}_k = \mathbf{diag} \{ 0, 0, \dots, \bar{q}_i^k, 0, \dots, 0 \}$

$$\bar{P}_k \Lambda_{k-1} + \Lambda_{k-1} \bar{P}_k - \bar{P}_k \bar{B}_k R^{-1} (\bar{B}_k)^T P_k \bar{Q}_k = 0 \quad (3.78)$$

$$K_k = \bar{K}_k T_k^{-1} (\bar{K}_k = R^{-1} (\bar{B}_k)^T \bar{P}_k) \quad (3.79)$$

$$(vi) \quad K: = K + K_k \quad (3.80)$$

$$Q_k = T_k^{-T} \bar{Q}_k T_k^{-1} \quad (3.81)$$

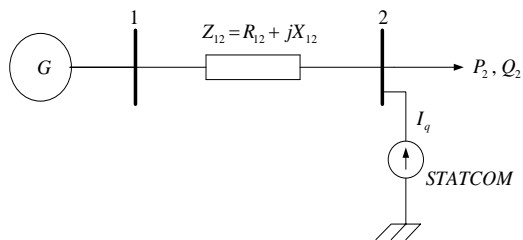
$$Q: = Q + Q_k \quad (3.82)$$

Simulasi dan Analisis Sistem

Bagian ini akan dibahas tentang pengaruh pemasangan STATCOM terhadap pengaturan tegangan pada bus yang dipasang STATCOM. Ada dua kondisi sistem yang diterapkan, yakni sistem *Single Machine Two Bus* dan sistem 500 kV interkoneksi Jawa-Bali. Pada simulasi sistem 500 kV Jawa-Bali, jumlah bus yakni sebanyak 20 yang terdiri dari bus beban sebanyak 13 buah dan bus generator ada 7. Dengan studi *load flow*, maka perlu ditentukan nilai matriks Jacobian yang direduksi sehingga diperoleh matriks *Jacobian Reduksi*. Setelah itu baru diperoleh nilai *eigen* dari matriks Jacobian Reduksi yang akan menentukan apakah sistem yang digunakan stabil.

Studi Kasus Sistem *Single Machine Two Bus*

Dari *single line diagram* dari kasus ini, kita akan segera ketahui pengaruh pemasangan STATCOM pada bus 2 terhadap perubahan beban pada bus ini. Di awal simulasi akan dilihat respons tegangan pada bus 2 tanpa pemasangan STATCOM, kemudian beberapa saat beban pada bus ini dinaikkan sehingga tegangan pada bus ini akan turun. Setelah itu, tegangan bus akan dinaikkan kembali ke nilai yang diinginkan dengan cara memasang STATCOM.



Gambar 1.15 Single Line Diagram Single Machine Two Bus

Data Sistem Single Machine Two Bus

Data Generator:

$$R_a = 0.00327$$

$$x_d = 0.99$$

$$x_d' = 0.2$$

$$x_q = 0.57$$

$$x_q' = 0.57$$

$$T_{do}' = 8.0$$

$$T_{qo}' = 1.0$$

$$H = 3.5$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

Data Jaringan: $Z_{12} = 0.0052731 + j0.05899158$

Data Beban:

1. Kondisi Awal: $P_{20} = 638.8 \text{ MW}$, $Q_{20} = 377.0 \text{ MVAR}$
2. Kondisi terjadi penambahan: $\Delta P_2 = 244 \text{ MW}$, $\Delta Q_2 = 888 \text{ MVAR}$

Data STATCOM:

$$f = 50$$

$$L = 0.15$$

$$R_s = 0.01$$

$$C = 0.88$$

$$k = 4 / \pi$$

$$R_p = 100 / k$$

$$M = -3 / 2 k \cdot \omega \cdot C$$

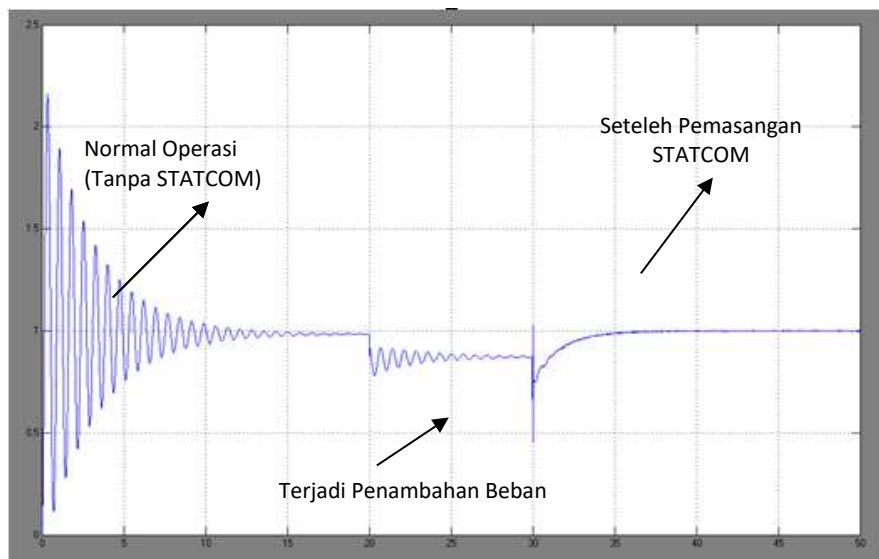
$$V_{dc} = 0.5$$

Hasil Simulasi Sistem *Single Machine Two Bus*

Simulasi ini dilakukan untuk tiga kondisi waktu berbeda. Pada waktu simulasi dari 0 – 20 detik pertama, akan dilihat tegangan pada bus 2 tanpa pemasangan STATCOM. Kemudian waktu yang kedua dari 20-30 detik, beban pada bus 2 ditambah. Sedangkan untuk *range* waktu dari 30 – 50 detik, STATCOM dimasukkan dalam sistem.

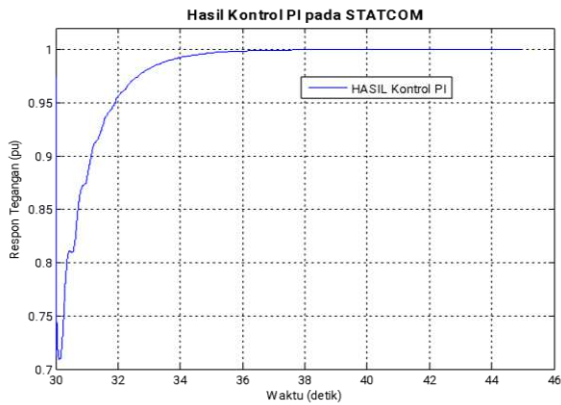
Hasil Simulasi Menggunakan PI Kontroler

Hasil Simulasi STATCOM dengan Kontrol PI ($K_p = 1.2$; $K_i = 0.9$)



Gambar 1.16 Hasil Simulasi Respons Tegangan pada Bus 2 dengan Kontrol PI

Respons Tegangan STATCOM dengan Kontrol PI (Kp = 1.2; Ki = 0.9)

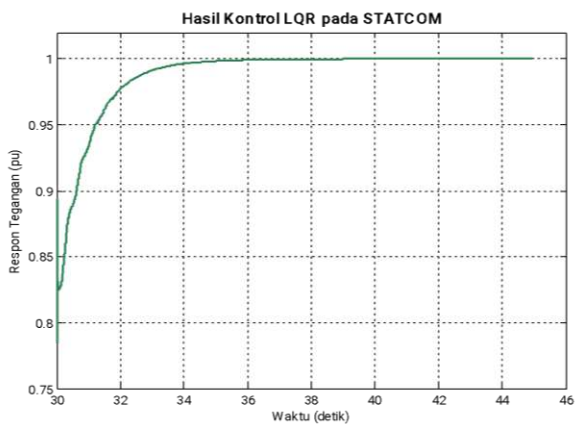


Gambar 1.17 Hasil Simulasi Kontrol PI (Kp=1.2; Ki=0.9)

Hasil Simulasi Menggunakan LQR Kontroler

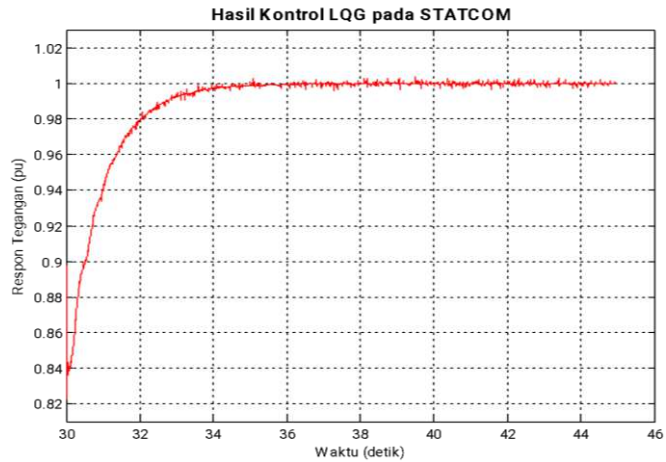
Hasil Simulasi STATCOM dengan Kontrol LQR

$$K = \begin{bmatrix} -0.0030 & 0.0005 & 0.0005 \\ 0.0005 & -0.0006 & -0.0001 \end{bmatrix}$$



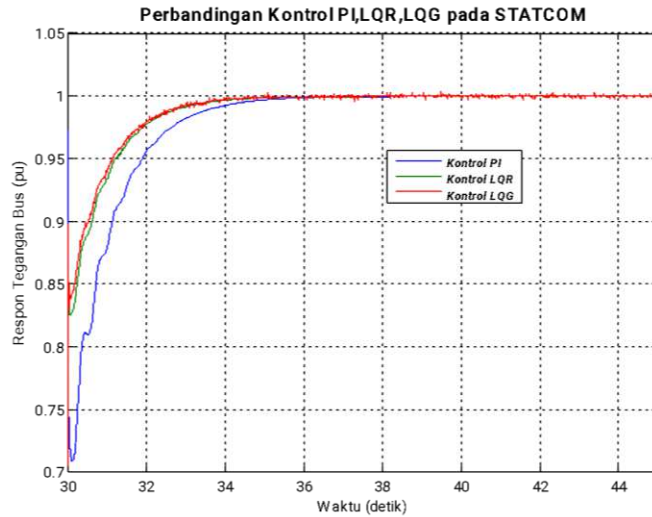
Gambar 1.18 Hasil Simulasi Kontrol LQR

Hasil Simulasi Menggunakan LQG Kontroler



Gambar 1.19 Hasil Simulasi Kontrol LQG

Perbandingan Hasil Kontrol PI, LQR dan LQG

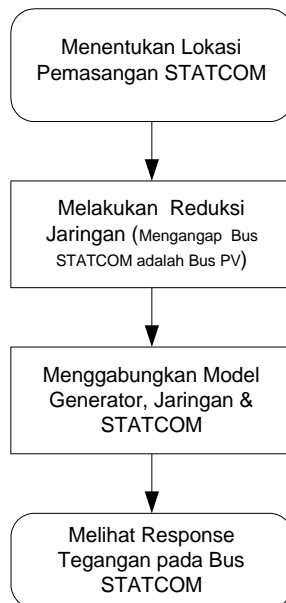


Gambar 1.20 Perbandingan Hasil Simulasi Kontrol PI, LQR dan LQG

Simulasi di atas menunjukkan, bahwa profil tegangan bus setelah pemasangan STATCOM yang dikontrol dengan metode LQG terlihat lebih baik. Kondisi ini tampak dari respons *over-shoot* yang tidak besar serta waktu *settling time* yang lebih cepat dibandingkan kontrol PI dan LQG.

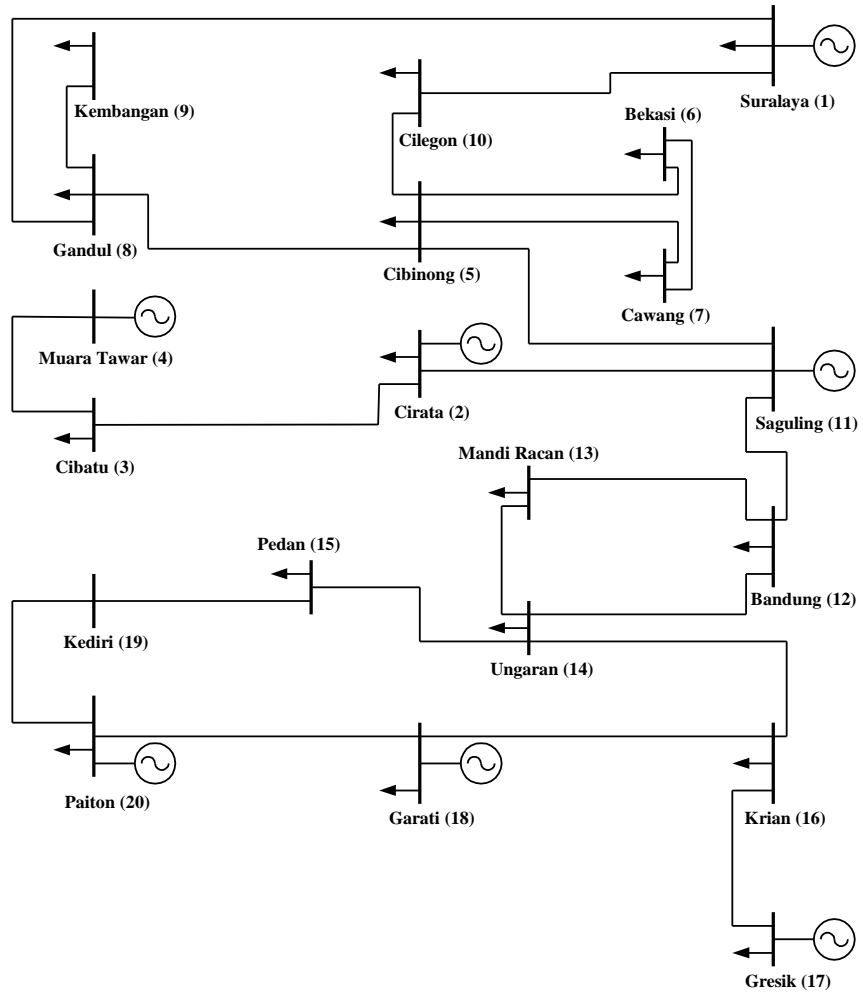
Studi Kasus Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali

Sistem tenaga listrik sebagai kondisi kedua adalah sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV. *Single Line Diagram* dari sistem ini dapat dilihat pada Gambar 4.1. Data sistem yang digunakan terdiri dari 20 bus dengan 7 pusat pembangkit. Prosedur pertama yang dilakukan ialah menentukan lokasi penempatan STATCOM. Setelah itu penentuan letak bus yang akan ditempatkan STATCOM, admitansi jaring yang terdiri dari 20 orde direduksi menjadi 8 orde. Bus STATCOM tidak ikut direduksi sebab bus ini dianggap bus generator (Bus PV). Agar lebih mudah memahami langkah-langkah dalam simulasi ini, berikut algoritma simulasi yang bisa disajikan.



Gambar 1.21 Algoritma Proses Simulasi Kasus Sistem Jawa-Bali

One line diagram sistem interkoneksi jaringan transmisi tegangan 500 kV Jawa-Bali seperti pada Gambar 4.8.



Gambar 1.22 Sistem Interkoneksi Jaringan Transmisi Tegangan 500 kV Jawa-Bali

Tabel 1.2 Data Pembangkit dan Pembebanan Sistem Interkoneksi 500 kV
Jawa-Bali

No	Bus	Jenis	Pembangkit		Konsumsi	
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q(Mvar)
1	Suralaya	Slack	-	-	132	44
2	Cirata	Generator	600	-	524.6	289
3	Cibatu	Beban	-	-	447.5	227
4	Muara Tawar	Generator	606	-	-	-
5	Cibinong	Beban	-	-	224.9	141
6	Bekasi	Beban	-	-	452.2	179
7	Cawang	Beban	-	-	594.7	322
8	Gandul	Beban	-	-	599.3	314
9	Kembangan	Beban	-	-	717.3	411
10	Cilegon	Beban	-	-	475.1	241
11	Saguling	Generator	432	-	-	-
12	Bandung	Beban	-	-	638.8	377
13	Mandiracan	Beban	-	-	428.9	283
14	Ungaran	Beban	-	-	384.7	227
15	Pedan	Beban	-	-	288.5	99.8
16	Krian	Beban	-	-	569.7	382
17	Gresik	Generator	681	-	432.7	457
18	Grati	Generator	442	-	200	120
19	Kediri	Beban	-	-	241.7	23.4
20	Paiton	Generator	2494	-	491.3	72.1

Tabel 1.3 Data Jaring Saluran Transmisi 500 kV Jawa-Bali

No.	Bus ke Bus	Panjang (km)	R (pu)	X (pu)
1	1-10	12.48	0.001754	0.019625
2	1-8	111	0.018237	0.175214
3	10-5	116	0.036773	0.411392
4	8-5	21.3	0.00349	0.033532
5	8-9	31.9	0.004237	0.047399
6	5-7	57	0.017885	0.171828
7	5-6	37.92	0.012437	0.119491
8	5-11	80.3	0.011778	0.131768
9	6-7	18	0.005526	0.053093
10	11-2	25.1	0.004129	0.039672
11	11-12	37.43	0.005273	0.058992
12	2-3	44.56	0.007672	0.073708
13	3-4	55	0.007902	0.075916
14	12-14	342.8	0.112513	1.080969
15	12-13	130	0.0335	0.374776

16	14-13	228	0.073403	0.705218
17	14-15	75	0.021084	0.235872
18	14-16	251	0.041414	0.397883
19	15-19	202.783	0.05763	0.644717
20	19-20	212.217	0.028815	0.322358
21	20-18	74	0.01242	0.138949
22	18-16	74	0.011162	0.124871
23	16-17	22.2	0.003774	0.036257

Menentukan Lokasi Pemasangan STATCOM pada Sistem Jawa-Bali 500 kV

Berdasarkan analisis *load flow* dengan metode *Newton-Raphson* (menggunakan m-file MATLAB), maka diperoleh nilai matriks Jacobian sebagai berikut.

Tabel 1.4 Nilai Matriks Jacobian Sistem Jawa-Bali 500 kV

Columns 1 through 12

1.106	-0.398	0	0	0	0	0	0	0	-0.707	0	0
-0.398	0.728	-0.329	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.329	0.329	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1.967	-0.464	-0.308	-0.825	0	-0.152	-0.219	0	0
0	0	0	-0.464	1.44	-0.977	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.308	-0.977	1.285	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.825	0	0	1.538	-0.554	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-0.554	0.554	0	0	0	0
0	0	0	-0.152	0	0	0	0	1.577	0	0	0
-0.707	0	0	-0.219	0	0	0	0	0	1.398	-0.472	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.472	0.658	-0.135
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.135	0.212
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.051	-0.077
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.042	-0.076	0.035	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-0.205	0.048	0.032	0.086	0	0.016	0.023	0	0
0	0	0	0.048	-0.15	0.102	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.032	0.102	-0.134	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.086	0	0	-0.152	0.05	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.05	-0.05	0	0	0	0
0	0	0	0.016	0	0	0	0	-0.143	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.042	-0.062	0.014

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.014	-0.022
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.005	0.008
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Lanjutan matriks Jacobian

Columns 13 through 24

0	0	0	0	0	0	0	-0.042	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0.074	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.035	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0.205	-0.048	-0.032	-0.086
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.048	0.15	-0.102	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.032	-0.102	0.134	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.086	0	0	0.152
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.05
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.016	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.023	0	0	0
-0.051	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.077	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.435	-0.237	-0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.237	0.364	0	0	0	-0.083	-0.045	0	0	0	0	0
-0.07	0	1.141	-0.827	-0.244	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-0.827	0.827	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-0.244	0	0.497	0	-0.253	0	0	0	0	0
0	-0.083	0	0	0	0.173	-0.09	0	0	0	0	0
0	-0.045	0	0	-0.253	-0.09	0.387	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0.706	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1.967	-0.464	-0.308	-0.825
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.464	1.44	-0.977	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.308	-0.977	1.285	0
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.825	0	0	1.536
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.554
0	0	0	0	0	0	0	0	-0.152	0	0	0
0.005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.046	0.025	0.007	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.025	-0.037	0	0	0	0.007	0.005	0	0	0	0	0
0.007	0	-0.116	0.087	0.022	0	0	0	0	0	0	0
0	0.007	0	0	0	-0.016	0.008	0	0	0	0	0

Columns 25 through 32

0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.016	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0

-0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0.142	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-0.042	0	0	0	0	0	0
0	0	0.062	-0.014	-0.005	0	0	0	0
0	0	-0.014	0.022	-0.008	0	0	0	0
0	0	-0.005	-0.008	0.046	-0.025	-0.007	0	0
0	0	0	0	-0.025	0.036	0	-0.007	0
0	0	0	0	-0.007	0	0.109	0	0
0	0	0	0	0	0	-0.087	0	0
0	0	0	0	0	0	-0.022	0	0
0	0	0	0	0	-0.007	0	0.015	0
0	0	0	0	0	-0.005	0	-0.008	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.152	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.554	0	0	0	0	0	0	0	0
0.554	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1.56	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0.658	-0.135	-0.051	0	0	0	0
0	0	-0.135	0.212	-0.077	0	0	0	0
0	0	-0.051	-0.077	0.433	-0.237	-0.07	0	0
0	0	0	0	-0.237	0.361	0	-0.083	0
0	0	0	0	-0.07	0	1.074	0	0
0	0	0	0	0	-0.083	0	0.167	0

Selanjutnya, matriks Jacobian direduksi menjadi sebagai berikut.

Tabel 1.5 Nilai Matriks Jacobian Reduksi Sistem Jawa-Bali 500 kV

0.736	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1.996	-0.471	-0.313	-0.837	0	-0.154	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.47	1.461	-0.991	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.313	-0.991	1.304	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.838	0	0	1.559	-0.561	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-0.561	0.561	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.154	0	0	0	0	1.591	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0.667	-0.137	-0.052	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.139	0.217	-0.079	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.053	-0.08	0.45	-0.246	-0.073	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.246	0.377	0	-0.086	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.073	0	1.155	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.087	0	0.177	0

Langkah selanjutnya menentukan nilai *eigen* dari matriks JR:

$\text{eigJR} =$

$1.0\text{e}+003 *$

2.8114

2.3578

1.6020

0.7355

1.2753

1.1630

0.3354

0.7170

0.6619

0.0894

0.2583

0.0813

0.1618

Dari nilai *eigen* JR diperoleh nilai *eigenvector* kanan, kiri dan diagonal sebagai berikut:

Tabel 1.6 Nilai *Eigenvector* Kanan (*Eigenvector Right*) Sistem Jawa-Bali
500 kV

0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-0.753	0.137	0.071	0	-0.513	0	0.06	0	0	-0.377	0	0	0
0.285	0.687	-0.013	0	0.17	0	0.425	0	0	-0.486	0	0	0
-0.031	-0.687	-0.032	0	0.275	0	0.455	0	0	-0.494	0	0	0
0.567	-0.184	0.229	0	-0.594	0	-0.291	0	0	-0.394	0	0	0
-0.141	0.057	-0.123	0	0.466	0	-0.724	0	0	-0.469	0	0	0
0.095	-0.027	-0.962	0	-0.25	0	0.007	0	0	-0.039	0	0	0
0	0	0	0	0	-0.01	0	0.881	-0.378	0	-0.106	0.145	-0.202
0	0	0	0	0	-0.008	0	-0.191	0.233	0	-0.482	0.431	-0.694
0	0	0	0	0	0.116	0	-0.34	-0.652	0	0.44	0.488	-0.131
0	0	0	0	0	-0.037	0	0.257	0.597	0	0.512	0.552	0.119
0	0	0	0	0	-0.993	0	-0.057	-0.097	0	0.036	0.033	-0.01
0	0	0	0	0	0.003	0	-0.041	-0.107	0	-0.547	0.499	0.669

Tabel 1.7 Nilai *Eigenvector* Kiri (*Eigenvector Left*) Sistem Jawa-Bali 500 kV

0	-0.753	0.286	-0.031	0.567	-0.141	0.095	0	0	0	0	0	0	0
0	0.137	0.687	-0.687	-0.184	0.057	-0.027	0	0	0	0	0	0	0
0	0.071	-0.013	-0.032	0.229	-0.124	-0.962	0	0	0	0	0	0	0
-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-0.513	0.17	0.276	-0.594	0.466	-0.25	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.01	-0.008	0.116	-0.037	-0.993	0.003	0
0	0.06	0.425	0.455	-0.291	-0.724	0.007	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0.885	-0.19	-0.335	0.252	-0.056	-0.04	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.385	0.235	-0.651	0.594	-0.096	-0.106	0
0	-0.377	-0.486	-0.494	-0.394	-0.469	-0.039	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.108	-0.488	0.439	0.51	0.036	-0.544	0
0	0	0	0	0	0	0	0.148	0.437	0.488	0.55	0.033	0.496	0
0	0	0	0	0	0	0	-0.205	-0.7	-0.13	0.118	-0.01	0.662	0

Tabel 1.8 Nilai *Eigenvector* Diagonal Sistem Jawa-Bali 500 kV

2.811	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2.358	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1.602	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.736	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1.275	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.163	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0.335	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0.717	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0.662	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.089	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.258	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.081	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.162

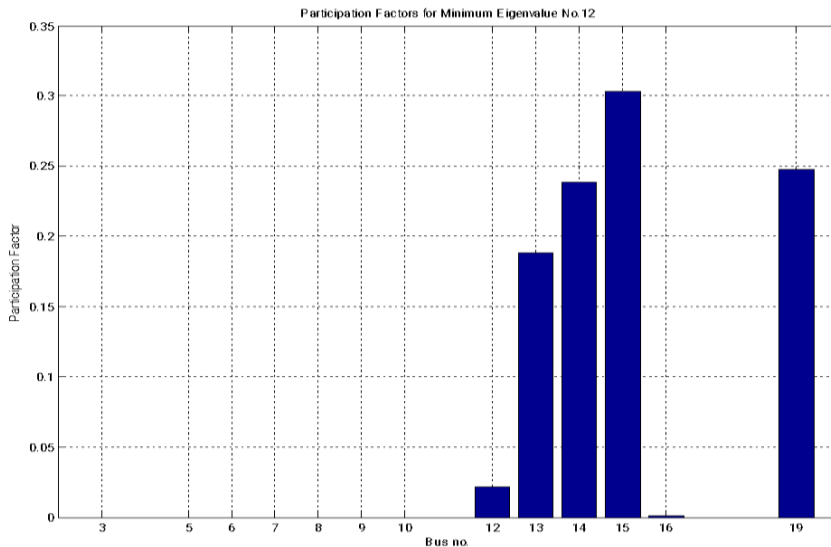
Setelah diperoleh nilai **Eigenvalues_Right** dan **Eigenvalues_Left**, maka *bus participation factor* dapat dihasilkan sebagai berikut.

Tabel 1.9 Nilai *Bus Participation Factor* Sistem Jawa-Bali 500 kV

0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.567	0.0187	0.005	0	0.263	0	0.0036	0	0	0.142	0	0	0	0
0.082	0.4722	0.0002	0	0.029	0	0.1808	0	0	0.237	0	0	0	0
0.001	0.4714	0.001	0	0.076	0	0.2066	0	0	0.244	0	0	0	0
0.321	0.0337	0.0525	0	0.353	0	0.0846	0	0	0.155	0	0	0	0
0.02	0.0033	0.0152	0	0.217	0	0.5244	0	0	0.22	0	0	0	0
0.009	0.0008	0.926	0	0.063	0	0.0001	0	0	0.002	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0.0001	0	0.78	0.145	0	0.012	0.021	0.0415	0
0	0	0	0	0	0.0001	0	0.036	0.055	0	0.235	0.188	0.4852	0
0	0	0	0	0	0.0134	0	0.114	0.425	0	0.193	0.238	0.017	0
0	0	0	0	0	0.0013	0	0.065	0.355	0	0.262	0.304	0.014	0
0	0	0	0	0	0.9851	0	0.003	0.009	0	0.001	0.001	0.0001	0
0	0	0	0	0	0	0	0.002	0.011	0	0.297	0.247	0.4423	0

Nilai akhir dari *bus participation factor* dapat dipelajari dari tabel berikut, bahwa bus dengan *participation factor* terbesar adalah **bus 15 (Pedan)**. Dari hasil ini, kita dapat menempatkan peralatan STATCOM pada bus tersebut untuk memperbaiki regulasi tegangan di dalamnya.

Tabel 1.10 Nilai Akhir *Bus Participation Factor* Sistem Jawa-Bali 500 kV

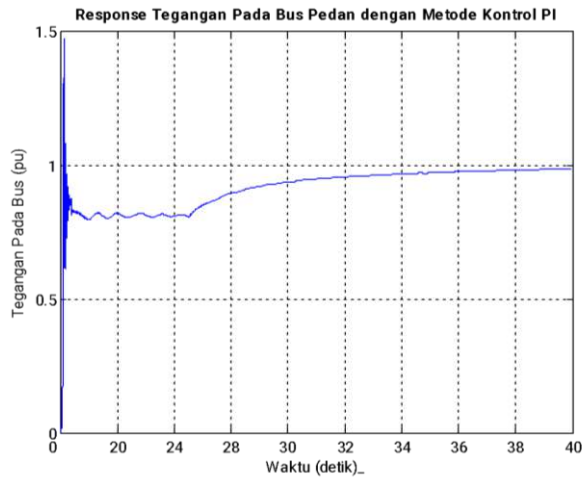


Hasil Simulasi 500 kV Interkoneksi Jawa-Bali

Berikut merupakan hasil simulasi dilakukan untuk tiga kondisi waktu berbeda. Simulasi dari 0 – 20 detik pertama untuk mengetahui tegangan pada bus 2 tanpa pemasangan STATCOM. Kemudian pada waktu yang kedua dari 20-25 detik, beban bus 2 ditambah, sedangkan pada *range* waktu dari 25 – 40 detik, STATCOM dimasukkan dalam sistem.

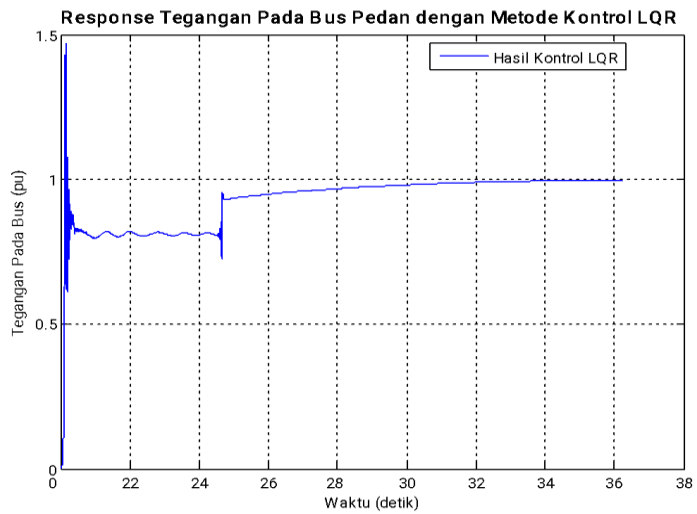
Hasil Simulasi dengan PI Kontroler (*Gain Kp yang diubah, Ki tetap*) Sistem Jawa Bali

Respons Tegangan Pada Bus Pedan $K_p=0.45$ $K_i=0.05$



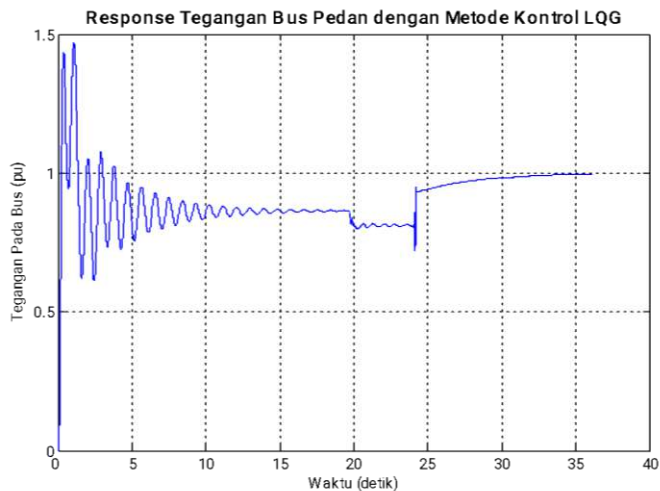
Gambar 1.23 Respons Tegangan pada Bus Pedan dengan Kontrol PI ($K_p=0.45$, $K_i=0.05$)

Hasil Simulasi Menggunakan LQR Kontroler



Gambar 1.24 Respons Tegangan pada Bus Pedan dengan Kontrol LQR

Hasil Simulasi Menggunakan LQG Kontroler



Gambar 1.25 Respons Tegangan pada Bus Pedan dengan Kontrol LQG

Intisari

Pada intinya, pemasangan STATCOM, baik pada sistem single mesin dan sistem interkoneksi 500 kV Jawa-Bali dilakukan untuk mempertahankan tegangan pada bus yang ditempatkan STATCOM. Apabila beban pada bus ini dinaikkan, maka tegangan pada bus akan turun dan mempengaruhi tegangan pada bus-bus lain. Ketika tegangan beberapa bus turun secara cepat dan bersamaan, maka fenomena *Voltage Collapse* akan terjadi. Salah satu fungsi STATCOM ialah mencegah fenomena ini. Metode kontrol yang diterapkan pada peralatan STATCOM sangat mempengaruhi respons tegangan pada bus yang ditempatkan.

Hasil simulasi pada kasus I (*Single Machine Two Bus*) menunjukkan, bahwa dengan menggunakan metode PI *overshoot* tegangan adalah 0.71 pu, sedangkan waktu menuju *steady state* adalah 7 detik setelah STATCOM dioperasikan. Kemudian dengan menggunakan metode LQR *overshoot* tegangan adalah 0.825 pu, sedang waktu menuju *steady state* adalah 6 detik setelah STATCOM dioperasikan. Sementara untuk metode

LQG *overshoot* tegangan adalah 0.84 pu, sedang waktu menuju *steady state* adalah 5 detik setelah STATCOM dioperasikan

Berbeda halnya dengan kasus II (Sistem Jawa Bali), di mana dengan menggunakan metode PI waktu menuju *steady state* adalah 15 detik setelah STATCOM dioperasikan. Kemudian apabila menggunakan metode LQR waktu menuju *steady state* adalah 10 detik setelah STATCOM dioperasikan. Sementara apabila menggunakan metode LQG, waktu menuju *steady state* adalah 8 detik setelah STATCOM dioperasikan. Dari kedua kasus ini maka dapat dikatakan, bahwa metode LQG ternyata didapatkan respons tegangan yang lebih baik dibandingkan metode kontrol PI dan LQR.

Dari hasil ini, penulis berharap bahwa penerapan STATCOM sebagai peredam osilasi damping sebaiknya dilakukan. Hal ini dipandang perlu untuk memfungsikan STATCOM sebagai peredam osilasi damping, dibutuhkan *supplementary control*. Selain itu, penentuan besar *gain* Kp dan Ki dalam hal ini diperoleh dengan metode *trial and error*. Artinya, hasil ini perlu dikonfirmasi lebih lanjut dengan metode penentuan besar Kp dan Ki yang baik.

Referensi

- [1] L. Gyugi, "Dynamic compensation of AC transmission lines by solid-state synchronous voltage sources". IEEE Trans. Power Delivery, Vol 9, No. 2 pp.904-911, April 1994.
- [2] S. Mori et al., "Development of large static var generator using self-commutated inverters for improving power system stability." IEEE Trans. Power Delivery, Vol 8, No. 1, Feb 1993.
- [3] Schauder, C, Gernhartr, M; Stacey, "Development of a 100 MVar static condenser for voltage control of transmission systems." IEEE Trans. Power Delivery, Vol 10, No. 1, July 1995.
- [4] Schauder, C, Gernhartr,M; stacey," Operation of 100 MVar STATCON," IEEE Trans. Power Delivery, Vol 12, No. 1, Oct 1997.
- [5] Jhon G. Vlachoginnis, "FACTS applications in load flow studies effect on the steady state analysis of the Hellenic transmission system", Electric Power Systems Research, Vol.55, Issue 3, Sept 2000.

- [6] Paptic, Zunko, Povh D," *Basic control of Unified power flow controller*". IEEE Trans. Power Delivery, Vol 12, No.4, Nov. 1997
- [7] Dong Shen and P.W Lehn, *Modeling, Analysis, and Control of a Current Source Inverter-Based STATCOM*, IEEE Transaction On Power Delivery, Vol.17, No. 1 January 2002.
- [8] Olimpo Anaya-Lara and E. Acha, *Modeling and Analysis of Custom Power Systems by PSCAD/EMTDC*. IEEE Transaction On Power Delivery, Vol.17, No. 1 January 2002.
- [9] P.S. Sensarma, K.R. Padiyar and V. Ramanarayanan, *Analysis and Performance Evaluation of a Distribution STATCOM for Compensating Voltage Fluctuations*, IEEE Transaction On Power Delivery, Vol.16, No. 2 January 2001.
- [10] M.Mohaddes, A.M. Gole, and Sladjana Elez, *Steady State Frequency Respons of STATCOM*, IEEE Transaction On Power Delivery, Vol.16, No. 2 January 2001.
- [11] Liqun Xing, *A Comparison of Pole Assignment & LQR Design Methods for Multivariable Control for STATCOM*, A Thesis submitted to the Department of Mechanical Engineering In Partial Fullfillment of the requirement for the degree of Master of Science, Fall Semester 2003.
- [12] Shen Dong, Wang Zhonghong, J.Y.Chen, and Y.H. Song, *Harmonic Resonance Phenomena in STATCOM and Relationship to Parameters Selection of Passive Components*, IEEE Transaction On Power Delivery, Vol.16, No.1 January 2001.
- [13] Kundur, Prabha *Power System Stability and Control*, Mc-Graw Hill 1993.
- [14] P. M. Anderson, and A.A. Fouad, *Power System Control and Stability*, The Iowa State University Press, 1982.
- [15] R. Mohan Mathur, Rajiv K. Varma, *Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems*, New York, 2002.
- [16] Isnuwardianto, Dr.Ir., *Dinamika dan Kendali Sistem Tenaga Listrik*, ITB.

- [17] Imam Robandi, *Optimal Controller, Fuzzy Logic Controller, And Genetic Algorithm on Modern Power System*, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2003.
- [18] M.A. Johnson & M.J. Grimble, *Recent Trends In Linear Optimal Quadratic Multivariable Control System Design*, IEEE Proc, Vol. 134, Pt.D, No.1, January 1987.
- [19] Briand. O. Anderson and John B. Moore, *Optimal Control (Linear Quadratic Methods)*, Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi, 1991.
- [20] Frank Lewis, *Optimal Control*, John Wiley & Sons, Inc, 1986.
- [21] Bramanto, *Penalaan PSS (Power System Stabilizer) Menggunakan Kontrol Optimal Melalui Metode Trial and Error di PLTA Saguling*, Tugas Akhir, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Oktober 1997.
- [22] Darmawan Widhiatmoko, *Studi tentang Pengendalian Frekwensi dan Tegangan Pada PLTA Saguling dengan Menggunakan Umpan Balik Optimal LQR*, Tugas Akhir, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Januari 1996.
- [23] IEEE Committee Report, *Dynamic Model for Steam and Hydro In Power Sistem Study*, IEEE Trans., 1973, Pas-92, pp.1904-1915.
- [24] IEEE Committee Report, *Excitation System Model For Power System Stability Study*, IEEE Trans., Vol. Pas-100, No.2, Februari 1981.
- [25] E.P. De Mello & Concordia, *Concepts of Synchronous Machine Stability By Excitation Control*, IEEE, Vol. Pas, No.4, April 1970.
- [26] R. Aditya Bayu H. *Penelaan System Stabilizer Menggunakan Kontroler Adaptive Melalui Metode MRAS di PLTA Saguling*, Tugas Akhir, Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya, Oktober 1997.

Bagian 2

Desain *Fuzzy Logic Load Frequency Control*: Pada Sistem Tenaga Listrik dengan *Artificial Immune System*

Dr. Eng. Muhammad Abdillah, S.T., M.T.
Email: m.abdillah@universitaspertamina.ac.id

Di era modern seperti saat ini, energi listrik merupakan kebutuhan penting bagi kehidupan manusia, sehingga keberadaannya harus memadai. Faktor paling signifikan dalam menjamin keandalan energi listrik adalah stabilitas sistem, baik saat kondisi normal maupun saat gangguan. Kestabilan merupakan aspek yang sangat penting dan harus diperhatikan di dalam sistem tenaga listrik. Kestabilan sistem merupakan bagian yang dapat dipengaruhi oleh gangguan besar maupun kecil. Terdapat dua macam gangguan, yaitu gangguan transien seperti putus jaring atau hubung singkat dan gangguan dinamik (di sekitar titik kerja) akibat perubahan beban yang relatif kecil [1]. Gangguan dinamik dapat mengakibatkan kinerja dinamik menjadi tidak baik, bahkan dapat membawa sistem ke daerah tidak stabil.

Di dalam sistem interkoneksi yang besar, banyak sistem pembangkit besar dan kecil yang terhubung secara sinkron. Artinya, semua pembangkit dituntut mempunyai frekuensi yang sama. Sebelum menentukan alokasi daya antar generator, perlu dibuat terlebih dahulu perkiraan mengenai besarnya daya yang akan ditanggung oleh sistem. Seiring dengan permintaan daya yang berkembang dan perubahan beban yang bervariasi tiap waktu, kemampuan pembangkit untuk merespons dalam menaikkan *output* secara cepat dari nol hingga beban penuh menjadi aspek yang penting. Kecepatan *governor* di tiap unit pembangkit memberikan kecepatan pokok sebagai fungsi kontrol sangat diperlukan

dalam sistem tenaga. Karena itulah frekuensi bukan merupakan besaran konstan, namun lebih ke besaran yang terus berubah sejalan dengan perubahan beban, sehingga sistem pengaturan frekuensi atau kenal dengan *Load Frequency Control* (LFC) [2] sangat diperlukan. *Load Frequency Control* (LFC) merupakan sistem untuk menjaga fluktuasi yang ditimbulkan oleh perubahan beban.

LFC memiliki objektif yang harus dicapai dalam pengoperasian sistem tenaga, khususnya untuk menjaga variasi frekuensi sistem dalam pembagian beban bagi tiap generator selama pertukaran daya antar bus untuk memenuhi kebutuhan beban yang telah dijadwalkan [3]. Untuk mengetahui performansi *Load Frequency Control* (LFC), kita perlu tahu tentang komponen-komponen dalam sistem tenaga yang mengacu pada pengontrolan frekuensi di dalamnya. Komponen tersebut meliputi *governor*, turbin, dan sistem beban, serta *speed droop governor* sebagai komponen pengatur proporsional untuk mengurangi kesalahan frekuensi yang terjadi selama kondisi operasi.

Dalam hal ini, desain kontrol optimal *Fuzzy Logic Tuning* kontroler PI di-*hybrid* dengan kontrol optimal LQR pada sistem *Load Frequency Control* (LFC) yang diaplikasikan pada sistem tenaga interkoneksi dua area. Dua area ini didesain menggunakan penalaan *Artificial Immune System* (AIS) via *Clonal Selection*. Metode ini menggunakan *Artificial Immune System* (AIS) via *Clonal Selection* untuk mengoptimisasi nilai-nilai matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR) dan parameter fungsi keanggotaan *Fuzzy Logic*. Metode penalaan *Artificial Immune System* (AIS) via *Clonal Selection* nantinya akan mengatur nilai matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} dengan mengubah elemen-elemen diagonal matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} , dan juga parameter fungsi keanggotaan *Fuzzy Logic* menjadi bentuk antibodi-antibodi yang terdiri atas banyak struktur nilai. Antibodi yang paling bagus setelah melalui proses iterasi merupakan matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} , serta parameter fungsi keanggotaan *Fuzzy Logic* yang optimum. Penalaan matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} kontrol optimal LQR digunakan untuk memperoleh penguatan \mathbf{K}_{op} optimum melalui penyelesaian *Algebraic Riccati Equation* (ARE), sementara penalaan

parameter fungsi keanggotaan *Fuzzy Logic* digunakan untuk memperoleh penguatan *proportional* K_p dan juga penguatan integral K_i yang optimum. Penguatan optimal LQR K_{opt} , penguatan *proportional* K_p dan penguatan integral K_i yang optimum diumpanbalikkan ke sistem agar ia lebih cepat stabil sehingga efisiensi waktu dan energi dapat kita peroleh.

Bagian kita, penulis berusaha memaparkan desain kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR), dan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) untuk memperbaiki respons pada *Load Frequency Control* (LFC) sistem tenaga listrik. Selain itu, kita juga akan mengetahui penerapan *Artificial Immune System* (AIS) via *Clonal Selection* untuk menghasilkan respons yang lebih bagus. Mengacu dari penerapan tersebut, kita nantinya akan memperoleh parameter-parameter yang optimum dari kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR), dan fungsi keanggotaan *Fuzzy Logic Controller* (FLC) menggunakan *Artificial Immune System* (AIS) via *Clonal Selection*. Semua keluaran ini diperoleh dari latar belakang dua permasalahan. Pertama yakni tentang cara mendesain *Fuzzy Tuning* kontroler PI dan Kontrol optimal LQR yang ditala menggunakan AIS. Kedua, ialah tentang hasil performansi sistem LFC sistem tenaga listrik setelah dipasang *Fuzzy Tuning* kontroler PI dan Kontrol optimal LQR yang ditala menggunakan AIS. Perlu juga dipahami bahwa penulis membatasi pokok bahasan di bagian ini yang mencakup beberapa aspek. Pertama, model sistem tenaga listrik yang digunakan adalah interkoneksi dua area. Kedua, sistem tenaga ini disimulasikan dengan menggunakan software MATLAB. Ketiga, karakteristik *plant* konvensional dan *plant* yang telah dilengkapi kontrol optimal LQR dan *Fuzzy Tuning* kontroler dengan simulasi menggunakan software MATLAB M-File. Keempat, sistem dianggap stabil, dan terakhir ialah sifat beban yakni statik.

Beberapa referensi yang digunakan antara lain paper-paper yang diterbitkan oleh suatu badan organisasi dalam bentuk majalah. Tentu saja yang berhubungan dengan *Load Frequency Control* (LFC), Kontrol Optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR), *Fuzzy Logic Controller*, dan *Artificial Immune System* (AIS) dari IEEE, dan Elsevier. Termasuk juga dari *proceeding* hasil seminar dalam bentuk buku dan juga buku teks komersial yang relevan.

Desain dan simulasi menggunakan *software* MATLAB dilakukan untuk melihat respons *output* pada sistem menggunakan kontrol konvensional (kontroler Integral, kontroler PI), dan juga menggunakan *Fuzzy Logic* untuk membandingkan kontroler PI di-*hybrid* dengan LQR yang ditala menggunakan AIS. Analisis dan perbandingan dilakukan terhadap *Load Frequency Control* (LFC) yang dipasang kontroler Integral, kontroler PI, kontroler PI dan kontrol optimal, *Fuzzy Logic* untuk membandingkan kontroler PI di-*hybrid* kontrol optimal, parameter *Fuzzy Logic* untuk membandingkan kontroler PI di-*hybrid* dengan kontrol optimal ditala menggunakan AIS.

Load Frequency Control

Semua pembangkit yang terhubung pada sistem interkoneksi skala besar (*large scale power system*) harus memiliki frekuensi yang sama. Hal ini karena sistem interkoneksi yang besar terdiri dari pembangkit besar dan kecil yang terhubung secara sinkron. Perkiraan tentang kapasitas daya yang akan ditanggung oleh sistem harus dibuat sebelum menentukan alokasi daya antar generator. Seiring dengan berkembangnya permintaan daya dan perubahan beban yang bervariasi setiap waktu, kemampuan pembangkit untuk menaikkan *output* secara cepat dari nol hingga beban penuh menjadi aspek yang penting. Sebab itulah frekuensi bukan merupakan besaran konstan, melainkan besaran yang selalu berubah secara kontinu sesuai perubahan beban, sehingga sistem pengaturan frekuensi atau *Load Frequency Control* (LFC) diperlukan.

Dalam pengoperasian sistem tenaga, LFC memiliki tujuan-tujuan yang harus dicapai. Utamanya ialah untuk menjaga kestabilan frekuensi dalam variasi pembagian beban yang telah dijadwalkan. Tujuan dasar pengaturan frekuensi dalam operasi tenaga listrik antara lain:

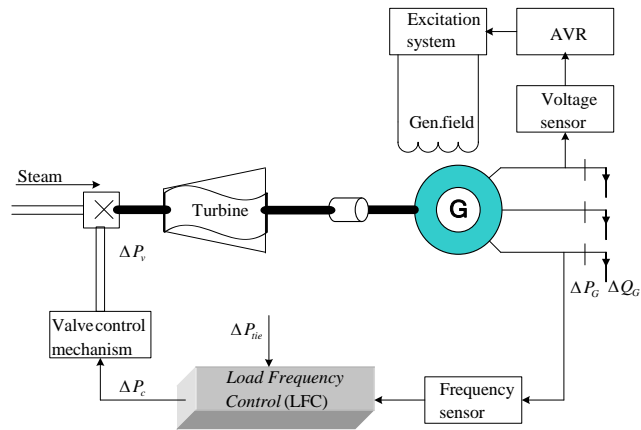
1. Memberikan keseimbangan sistem pembangkit ke beban.
2. Memperkecil penyimpangan frekuensi akibat perubahan beban secara tiba-tiba maupun permanen, sehingga tetap menuju nol setiap saat.

3. Menjaga aliran daya pada unit-unit pembangkit yang terinterkoneksi, sehingga berada pada derajat yang ditetapkan dengan kemampuan masing-masing.

Daya Aktif dan Pengaturan Frekuensi

Frekuensi suatu sistem bergantung pada keseimbangan daya aktif. Frekuensi di sini merupakan faktor utama dari keseluruhan sistem. Perubahan kebutuhan daya aktif terhadap satu titik operasi menjadi penyebab terjadinya perubahan frekuensi sistem. Hal ini dipicu oleh generator yang menyuplai daya ke dalam sistem berjumlah banyak. Sehingga kita perlu melakukan pembagian kebutuhan untuk tiap-tiap generator. Suatu *governor* pada setiap unit generator berfungsi sebagai pengatur utama kecepatan, sedangkan pengatur pengganti pada sebuah pusat pengaturan berfungsi untuk mengalokasikan pola pembangkitan.

Sebuah sistem yang dihubungkan dengan dua atau lebih area kontrol memiliki pembangkitan dalam setiap area dikontrol yang fungsinya ialah menjaga perubahan daya yang dijadwalkan. Pengaturan pembangkitan dan frekuensi dikenal sebagai *Load Frequency Control* (LFC). Gambar berikut merupakan diagram skematik *loop Load Frequency Control* (LFC) dan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) pada sebuah generator sinkron. Dalam interkoneksi sistem tenaga listrik, LFC dan AVR dipasang pada masing-masing generator. Kontroler diatur untuk kondisi operasi tertentu, sekaligus untuk menjaga perubahan-perubahan beban yang kecil dalam rangka memelihara agar frekuensi dan magnitudo tegangan tidak melebihi dari batas yang ditentukan atau diizinkan.



Gambar 2.1 Diagram Skematik *Loop Load Frequency Control (LFC)* dan *Automatic Voltage Regulator (AVR)* Sebuah Generator Sinkron

Keterangan,

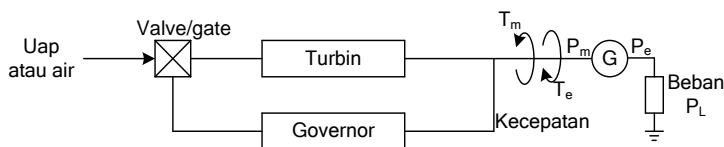
- ΔP_G = Daya aktif generator
- ΔQ_{G1} = Daya reaktif generator
- ΔP_C = Pengatur kecepatan
- ΔP_V = Pengatur posisi *valve/gate*
- ΔP_{tie} = Daya *tie-line*

Perubahan pada daya real (aktif) bergantung pada perubahan sudut rotor δ dan frekuensi. Sementara untuk perubahan daya reaktif bergantung pada magnitudo tegangan (pada eksitasi generator). Konstanta waktu sistem eksitasi lebih kecil dibandingkan konstanta waktu prime mover (penggerak utama), serta kekurangan *transient*-nya lebih cepat dan tidak mempengaruhi dinamika LFC. Dengan demikian, pertukaran silang antara *loop* LFC dan *loop* AVR dapat diabaikan. Kontrol frekuensi beban dan tegangan eksitasi pada generator di analisis secara independen (sendiri-sendiri). Sinyal deviasi $\Delta\delta$ akan dikoreksi saat terjadi perubahan dalam frekuensi dan daya real (aktif) *tie-line* dirasakan yakni dengan mengukur perubahan sudut rotor δ . Sinyal deviasi Δf dan ΔP_{tie} dikuatkan, lalu diubah menjadi daya real yang mengontrol sinyal ΔP_V

dikirim ke prime mover untuk mengaktifkan kenaikan pada torka. Prime mover (penggerak utama) selanjutnya membawa perubahan pada *output* generator sejumlah nilai ΔP_G yang nantinya mengubah nilai Δf dan ΔP_{tie} dengan toleransi yang ditentukan/diizinkan.

Dasar Pengaturan Kecepatan

Konsep dasar pengaturan kecepatan digambarkan dengan sebuah unit pembangkit yang terisolasi menyuplai suatu beban lokal, seperti gambar berikut.



Gambar 2.2 Generator Menyuplai Beban Lokal

Keterangan,

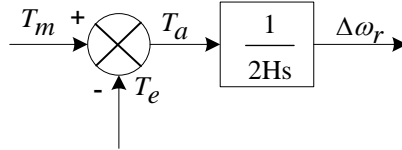
- T_m = Torka mekanik
- T_e = Torka elektrik
- P_m = Daya mekanik
- P_e = Daya elektrik
- P_L = Daya beban

Gambar di atas merupakan proses tarik menarik antara torka mekanik T_m dan torka elektrik T_e . Hubungan antara torka mekanik T_m dan torka elektrik T_e dijelaskan lebih lanjut di luar bagian ini.

Respons Generator terhadap Perubahan Beban

Pada saat di dalam sistem terdapat perubahan beban, maka perubahan ini direpresentasikan sebagai perubahan *output* torka elektrik T_e pada generator. Perbedaan nilai torka mekanik T_m dengan torka elektrik T_e menghasilkan putaran dalam variasi kecepatan $\Delta\omega$, sesuai dengan persamaan gerak. Fungsi alih yang ditunjukkan gambar berikut

merupakan hubungan antara kecepatan rotor sebagai fungsi dari torka elektrik dan mekanik.



Gambar 2.3 Fungsi Alih Hubungan Kecepatan dengan Torka

Berikut persamaan matematis berdasarkan gambar di atas.

$$\Delta\omega_r = \frac{1}{2Hs} T_a$$

$$T_a = T_m - T_e$$

$$\Delta\omega_r = \frac{1}{2Hs} (T_m - T_e)$$

dengan,

T_m = Torka mekanik (pu)

T_e = Torka elektrik (pu)

T_a = Torka percepatan (pu)

H = Ketetapan inersia (MWsec/MVA)

$\Delta\omega_r$ = Deviasi kecepatan rotor (pu)

Untuk melakukan analisis frekuensi beban, hubungan di atas lebih baik dinyatakan dalam variabel daya mekanik dan elektrik daripada dalam torka. Hubungan antara daya P dan torka T diberikan oleh,

$$P = \omega_r T \tag{2-1}$$

Kemudian dengan mempertimbangkan deviasi kecil (ditunjukkan dengan Δ), maka dapat ditulis,

$$P = P_o + \Delta P$$

$$T = T_o + \Delta T$$

$$\omega_r = \omega_o + \Delta\omega_r$$

Sehingga persamaan (2-1) menjadi,

$$P_o + \Delta P = (\omega_o + \Delta\omega_r)(T_o + \Delta T) \quad (2-2)$$

Hubungan antara nilai gangguan dengan orde yang lebih tinggi diabaikan, sehingga Persamaan (2-2) diberikan oleh,

$$\Delta P = \omega_o \Delta T + T_o \Delta\omega_r \quad (2-3)$$

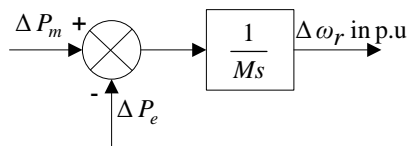
sehingga,

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_o (\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{mo} - T_{eo}) \Delta\omega_r \quad (2-4)$$

Pada kondisi mantap, torka mekanik dan torka elektrik sama, $T_{mo} = T_{eo}$, dengan kecepatan yang dinyatakan dalam pu, $\omega_o = 1$, sehingga dapat ditulis,

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \Delta T_m - \Delta T_e \quad (2-5)$$

Berikut representasi yang disajikan dalam bentuk diagram blok.



Gambar 2.4 Fungsi Alih Hubungan Daya dan Kecepatan

dengan,

ΔP_m = Perubahan daya mekanik

ΔP_e = Perubahan daya elektrik

$\Delta\omega_r$ = Deviasi kecepatan rotor

M = Konstanta Inersia

Respons Beban terhadap Penyimpangan Frekuensi

Daya beban merupakan gabungan dari suatu variasi peralatan listrik. Pada beban resistif, seperti beban lampu dan pemanas, daya listrik merupakan frekuensi bebas. Dalam kasus beban motor, seperti pompa

dan fan, perubahan daya listrik dan frekuensi berkaitan dengan perubahan kecepatan motor. Secara holistik, karakteristik frekuensi bergantung pada sebuah beban gabungan yang dinyatakan sebagai berikut,

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D \Delta \omega_r \quad (2-6)$$

dengan,

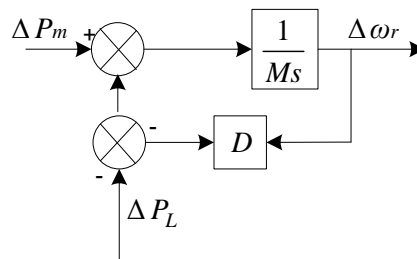
ΔP_L = Perubahan beban tanpa kepekaan frekuensi

$D \Delta \omega_r$ = Sensitivitas frekuensi terhadap perubahan beban

D = Konstanta redaman beban

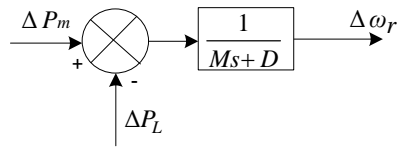
Konstanta redaman dinyatakan sebagai persentase perubahan dalam beban terhadap 1% perubahan frekuensi. Nilai khusus D ialah 1 sampai 2 persen. Nilai dari D=2 artinya perubahan frekuensi 1% akan menyebabkan perubahan beban sebesar 2%.

Diagram blok sistem termasuk efek redaman beban ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram Blok Sistem Beban

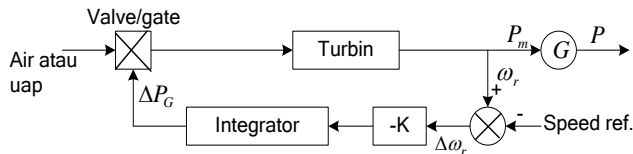
Gambar di atas bisa disederhanakan. Tanpa sebuah pengatur kecepatan, respons sistem terhadap perubahan beban ditentukan oleh konstanta inersia dan redaman. Deviasi kecepatan dalam kondisi mantap sehingga perubahan pada beban secara tepat dikompensasi oleh variasi beban sesuai dengan sensitivitas frekuensi.



Gambar 2.6 Penyederhanaan Diagram Blok Sistem Beban

Isynchronous Governor

Isynchronous governor mengatur *valve/gate* turbin dibutuhkan untuk membawa frekuensi kembali pada harga nominalnya. Gambar di bawah ini merupakan ilustrasi secara skematik sistem *speed governing*. Perbandingan *rotor speed* ω_r dengan *reference speed* ω_0 adalah sebagai *signal error*. *Signal error* diperkuat dan dibulatkan pada kontrol sinyal ΔP_G , yang nantinya menggerakkan *valve* pada turbin uap dan *gate* pada turbin air. Oleh karena aksi pengesetan ulang dari pengontrol integral ini, ΔP_G akan mencapai keadaan mantap yang baru saat *speed error* $\Delta\omega_r$ sama dengan nol.



Gambar 2.7 Skema Isochronous Governor

keterangan,

ΔP_G = Posisi *valve/gate*

ω_r = Kecepatan rotor

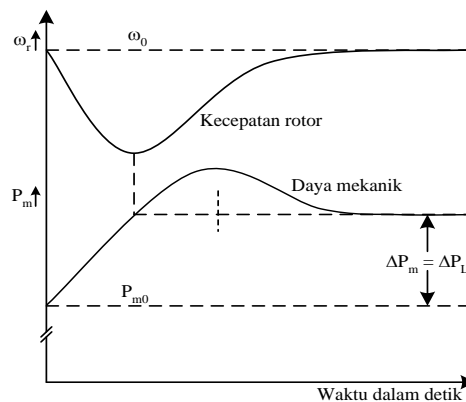
P_m = Daya mekanik

G = Generator

Gambar di bawah ini merupakan respons terhadap waktu dari suatu unit pembangkit, dengan sebuah *isochronous governor*, saat terjadi

peningkatan beban. Peningkatan P_e menyebabkan frekuensi menjadi berkurang pada nilai rata-rata yang ditentukan oleh inersia rotor. Karena penurunan kecepatan, maka daya mekanik turbin mulai naik. Kondisi inilah yang membuat pengurangan laju kecepatan, dan kemudian peningkatan kecepatan terjadi ketika daya turbin melebihi daya beban. Pada akhirnya, kecepatan akan kembali ke nilai awal dan daya mantap turbin meningkat pada suatu nilai yang mana sebanding dengan beban tambahan.

Suatu *isochronous governor* bekerja dengan baik saat sebuah generator menyuplai suatu beban yang terisolasi. Atau mungkin hanya satu generator dalam sebuah sistem multigenerator diperlukan untuk merespons perubahan beban.

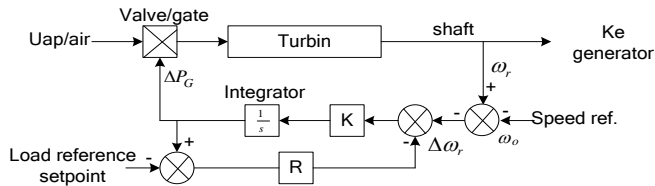


Gambar 2.8 Respons Unit Generator dengan *Isynchronous Governor*

Governor dengan Karakteristik *Speed-Droop*

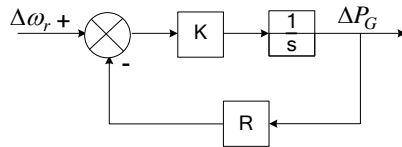
Isynchronous governor tidak dapat digunakan saat ditemukan dua atau lebih unit yang dihubungkan pada sistem yang sama. Hal ini karena setiap generator harus mempunyai *setting* kecepatan yang sama. Sebaliknya, *isynchronous governor* akan saling berbenturan, setiap mencoba untuk mengontrol frekuensi sistem pada *setting* masing-masing. Pada bagian beban yang stabil antara dua atau lebih unit yang beroperasi

secara paralel, *governor* dilengkapi semacam karakteristik tertentu sehingga kecepatan turun ketika beban ditingkatkan. Karakteristik *speed-droop* diperoleh dengan menambah suatu umpan balik mantap di sekitar *integrator* seperti ditunjukkan pada gambar berikut.

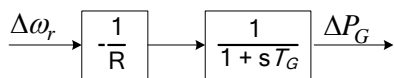


Gambar 2.9 Governor dengan Umpan Balik Mantap

Fungsi alih *governor* pada gambar di atas disederhanakan menjadi bentuk yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Tipe *governor* ini dikarakterkan sebagai suatu *kontroler proportional* dengan penguatan $1/R$.



(a) Diagram blok dengan umpan balik mantap



(b) Penyederhanaan diagram blok

Gambar 2.10 Diagram Blok Penurunan Kecepatan Governor

Keterangan:

K = Penguatan *proportional*

R = *Speed-droop*

T_G = Konstanta waktu *governor*

$$T_G = \frac{I}{KR}$$

Persentase Penurunan atau Pengaturan Kecepatan

Harga R merupakan penentu kecepatan mantap lawan karakteristik beban dari unit generator gambar di bawah. Perbandingan perubahan kecepatan $\Delta\omega_r$ atau perubahan frekuensi Δf pada perubahan posisi *valve/gate* ΔP_G atau daya *output* ΔP tersebut sama dengan R. Parameter R didasarkan sebagai penurunan atau perubahan kecepatan. Maka dari itu, kita dapat ekspresikan dalam persentase sebagai berikut.

$$R(\%) = \frac{\text{persentase perubahan frekuensi atau kecepatan}}{\text{persentase perubahan daya output}} \times 100$$

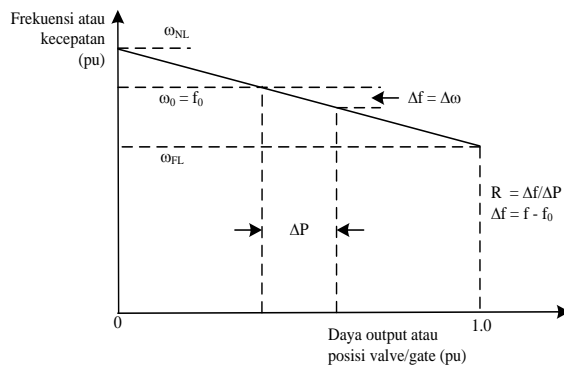
$$= \left[\frac{\omega_{NL} - \omega_{FL}}{\omega_0} \times 100 \right]$$

dengan,

ω_{NL} = Kecepatan mantap tanpa beban

ω_{FL} = Kecepatan mantap berbeban

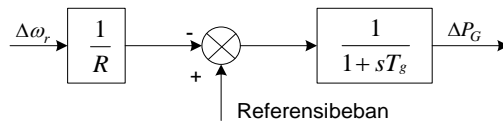
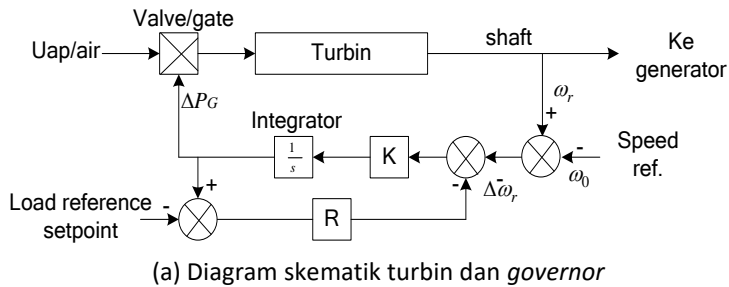
ω_0 = Kecepatan dasar atau nominal



Gambar 2.11 Karakteristik Mantap Ideal Suatu *Governor* dengan Penurunan Kecepatan

Pengaturan Daya Output dari Unit Pembangkit

Hubungan antara kecepatan dan beban dapat disesuaikan dengan mengubah inputan yang menunjukkan sebagai “set point referensi beban” oleh gambar berikut.

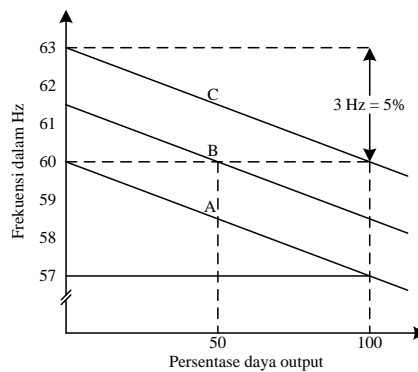


Gambar 2.12 Governor dengan Referensi Kontrol Beban untuk Pengaturan antara Kecepatan–Beban

Pada kenyataannya, perubahan pengaturan perubahan beban dilakukan dengan mengoperasikan “speed-changer motor”. Pengaturan ini dapat ditunjukkan melalui gambar di bawah, yang merepresentasikan suatu kumpulan dari karakteristik paralel untuk pengaturan-pengaturan perubahan kecepatan motor yang berbeda. Karakteristik ditunjukkan untuk suatu governor yang dihubungkan dengan suatu sistem berfrekuensi 60 Hz. Tiga karakteristik yang ditunjukkan mewakili tiga setting load reference. Pada frekuensi 60 Hz, karakteristik A menghasilkan output nol, karakteristik B menghasilkan output 50%, dan karakteristik C menghasilkan output 100%. Dengan demikian, daya output unit pembangkit pada suatu kecepatan yang diberikan dapat disesuaikan dengan berbagai nilai yang diinginkan melalui setting load reference

dengan aktuasi perubahan kecepatan motor. Di setiap *setting*, karakteristik kecepatan beban mempunyai penurunan 5%. Perubahan kecepatan 5% (3 Hz) menyebabkan perubahan daya *output* 100%.

Pada saat dua atau lebih generator mengoperasikan dalam keadaan paralel, karakteristik *speed-droop* (yang sesuai terhadap suatu *setting* referensi beban) pada tiap unit pembangkit hanya menetapkan proporsi beban yang diambil oleh unit saat terjadi perubahan mendadak di dalam sistem muatan (beban). *Output* masing-masing unit pada frekuensi sistem yang diberikan dapat divariasikan dengan cara mengubah referensi beban dan pengaruhnya dalam memindahkan karakteristik *speed-droop* naik turun.

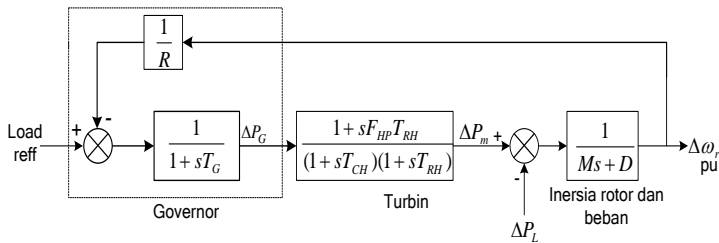


Gambar 2.13 Efek *Setting* Pengubah Kecepatan pada Karakteristik *Governor*

Saat unit pembangkit menyuplai suatu beban yang terisolasi, penyesuaian pada *speed-changer* akan mengubah kecepatan unit. Namun ketika unit tersebut disinkronkan pada suatu sistem tenaga, *speed-changer* akan menyesuaikan perubahan daya *output* unit. Kondisi ini hanya efek kecil pada frekuensi sistem yang menggantungkan pada ukuran unit yang relatif terhadap generasi sistem keseluruhan.

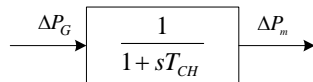
Pemodelan Turbin

Sejauh ini, kita sudah menganalisis bentuk mantap dari *speed-governing* sistem yang kemudian perlu kita uji tingkat respons relatif dari pada turbin uap dan sistem pengaturannya. Turbin uap mungkin jenis *reheat* maupun *non-reheat*. Gambar berikut merupakan diagram blok suatu unit pembangkit dengan sebuah turbin *reheat*. Diagram blok ini menggambarkan kecepatan *governor*, turbin, perputaran massa dan beban untuk pendekatan terhadap analisis frekuensi beban.



Gambar 2.14 Diagram Blok Unit Pembangkit dengan *Reheat Steam* Turbin

Diagram blok pada di atas juga dapat dipakai pada sebuah unit dengan turbin *non-reheat*. Akan tetapi, dalam kasus ini $T_{RH}=0$, dan fungsi alih turbin secara sederhana seperti ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.15 Fungsi Alih *Non-Reheat* Turbin

Dari tersebut, pemodelan turbin uap *non-reheat* yang merupakan model sederhana secara matematis dapat dijabarkan menjadi persamaan berikut.

$$\Delta P_m = \frac{1}{1 + sT_{CH}} \Delta P_G \quad (2-7)$$

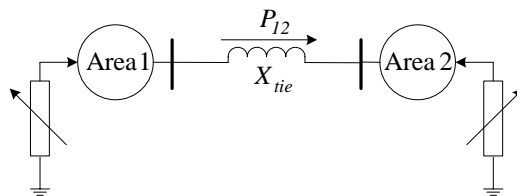
dengan,

= Daya keluaran turbin uap

= Konstanta waktu turbin uap

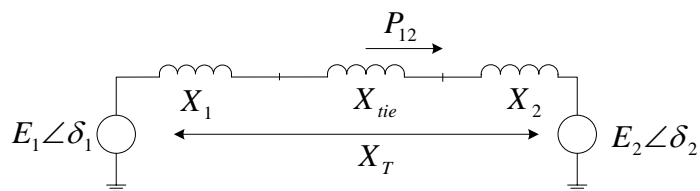
Model Linear Sistem Interkoneksi Dua Area

Sistem pada gambar di bawah ini terdiri dari dua area yang dihubungkan dengan sebuah reaktansi saluran X_{tie} . Untuk studi LFC, setiap area direpresentasikan sebagai sebuah ekuivalen unit pembangkit. Pemodelan seperti ini dapat diterima jika tidak memperhitungkan osilasi dalam tiap-tiap mesin pada tiap-tiap area.



(a) Sistem dua area

Sementara pada gambar di bawah ini menunjukkan rangkaian listrik ekuivalen dari sistem, dengan masing-masing area diwakili oleh sebuah sumber tegangan dibelakang reaktansi ekuivalen jika dipandang dari *tie bus*.



(b) Rangkaian ekuivalen

Gambar 2.16 Representasi Sistem Tenaga Dua Area

Aliran daya dari area 1 menuju area 2 adalah

$$P_{12} = \frac{E_1 E_2}{X_T} \sin \delta_{12} \quad (2-8)$$

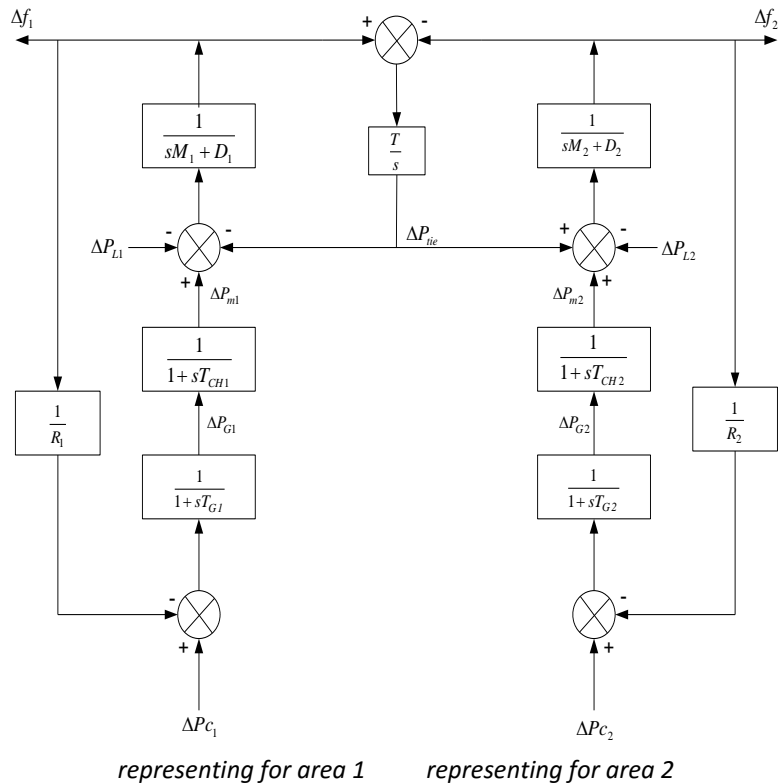
dengan $X_T = X_1 + X_{tie} + X_2$, dan $\delta_{12} = \delta_1 - \delta_2$. Persamaan (2-8) dapat dilinearisasi untuk perubahan kecil pada aliran daya jaring ΔP_{12} , sehingga,

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12}} \Delta \delta_{12} \\ &= T \Delta \delta_{12} \end{aligned}$$

dengan $\Delta \delta_{12o} = \Delta \delta_{1o} - \Delta \delta_{2o}$, dan T adalah koefisien torsi sinkron yang diberikan oleh,

$$\begin{aligned} T &= \left. \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \right|_{\delta_{12o}} = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \cos \Delta \delta_{12o} \\ \Delta P_{12} &= T (\Delta \delta_1 - \Delta \delta_2) \quad (2-9) \end{aligned}$$

Diagram blok sistem yang ditunjukkan gambar di bawah memuat tiap-tiap area yang diwakili oleh sebuah inersia ekuivalen M, konstanta load-damping D, turbin, dan sistem *governor* dengan penurunan kecepatan efektif R. Saluran diwakili oleh koefisien torka sinkron T. ΔP_{12} positif artinya peningkatan aliran daya dari area 1 menuju area 2. Artinya, telah terjadinya peningkatan beban pada area 1 dan penurunan beban pada area 2 sehingga *feedback* dari ΔP_{12} mempunyai tanda negatif untuk area 1 dan positif untuk area 2.



Gambar 2.17 Model Linear Sistem Tenaga Listrik Interkoneksi Dua Area [4]

Keterangan:

- M_1 = Momen inersia area 1
- M_2 = Momen inersia area 2
- T_{CH1} = Konstanta waktu turbin area 1
- T_{CH2} = Konstanta waktu turbin area 2
- T_{G1} = Konstanta waktu *governor* area 1
- T_{G2} = Konstanta waktu *governor* area 2
- R_1 = *Speed droop* area 1
- R_2 = *Speed droop* area 2
- T = Konstanta sinkronisasi antar area

- Δf_1 = Perubahan frekuensi area 1
 ΔP_{m1} = Perubahan daya mekanik area 1
 ΔP_{G1} = Perubahan level katup area 1
 Δf_2 = Perubahan frekuensi area 2
 ΔP_{m2} = Perubahan daya mekanik area 2
 ΔP_{G2} = Perubahan level katup area 2.
 ΔP_{tie} = Perubahan daya pada jaring

Deviasi frekuensi mantap $f - f_0$ untuk dua area adalah sama, yakni bergantung dari perubahan beban ΔP_L . Perubahan frekuensi dirumuskan melalui Persamaan (2-10).

$$\Delta f = \Delta \omega_1 = \Delta \omega_2 = \frac{-\Delta P_L}{(1/R_1 + 1/R_2) + (D_1 + D_2)} \quad (2-10)$$

Nilai mantap jika memperhitungkan terjadinya penambahan beban area 1 oleh ΔP_{L1} . Untuk area 1,

$$\Delta P_{m1} - \Delta P_{L2} - \Delta P_{L1} = D_1 \Delta f \quad (2-11)$$

dan untuk area 2,

$$\Delta P_{m2} + \Delta P_{L2} = D_2 \Delta f \quad (2-12)$$

Perubahan daya mekanik area 1 dan area 2 tergantung dari regulasi. Sehingga,

$$\Delta P_{m1} = -\frac{\Delta f}{R_1} \quad (2-13)$$

$$\Delta P_{m2} = -\frac{\Delta f}{R_2} \quad (2-14)$$

Dengan melakukan substitusi Persamaan (2-13) ke dalam Persamaan (2-11) dan Persamaan (2-14) ke dalam Persamaan (2-12), maka diperoleh:

$$\Delta f \left(\frac{I}{R_1} + D_1 \right) = -\Delta P_{12} - \Delta P_{L1} \quad (2-15)$$

dan

$$\Delta f \left(\frac{I}{R_2} D_2 \right) = \Delta P_{12} \quad (2-16)$$

Solusi dari Persamaan (2-13) dan (2-14) adalah,

$$\Delta f = \frac{-\Delta P_{L1}}{(1/R_1 + D_1) + (1/R_2 + D_2)} = \frac{-\Delta P_{L1}}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2-17)$$

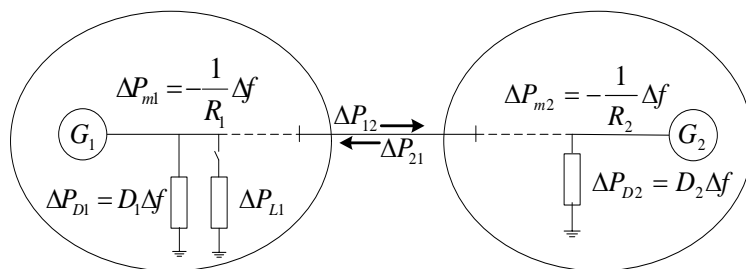
dan

$$\Delta P_{12} = \frac{-\Delta P_{L1} (1/R_2 + D_2)}{(1/R_1 + D_1) + (1/R_2 + D_2)} = \frac{-\Delta P_{L1}}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2-18)$$

keterangan,

$$\beta_1 = \left(\frac{I}{R_1} + D_1 \right) \quad \beta_2 = \left(\frac{I}{R_2} + D_2 \right)$$

β_1 , β_2 merupakan gabungan karakteristik respons frekuensi dari area 1 dan area 2. Hubungan di atas digambarkan dalam berikut.



Gambar 2.18 Pengaruh Perubahan Beban pada Area 1

Penambahan beban area 1 sebesar ΔP_{L1} , akan menurunkan frekuensi kedua area dan aliran daya pada *tie-line* ΔP_{12} . Notasi ΔP_{12} bernilai negatif yang mana berarti aliran daya dari area 2 menuju area 1. Deviasi aliran daya pada saluran mencerminkan kontribusi dari karakteristik regulasi $(1/R+D)$ area yang satu ke area yang lain. Dengan cara yang sama, apabila terjadi perubahan beban pada area 2 sebesar ΔP_{L2} , maka:

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_{L2}}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2-19)$$

$$\Delta P_{12} = -\Delta P_{21} = \frac{\Delta P_{L2}\beta_1}{\beta_1 + \beta_2} \quad (2-20)$$

Persamaan (2-20) di atas menjadi dasar LFC pada sistem interkoneksi.

Persamaan Keadaan Sistem

Berikut persamaan matematis dari keadaan yang sudah dijelaskan di atas.

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}d(t) \quad (2-21)$$

$$y(t) = \mathbf{C}x(t) \quad (2-22)$$

dengan,

A = Matriks sistem

B = Matriks masukan

C = Matriks pengukuran

L = Matriks gangguan

$x(t)$ = Variabel keadaan

$u(t)$ = Variabel masukan

$d(t)$ = Vektor gangguan dari perubahan beban

$y(t)$ = Variabel keluaran

State variabel dapat ditulis

$$x(t) = [\Delta f_1 \Delta P_{m1} \Delta P_{G1} \Delta P_{tie} \Delta f_2 \Delta P_{m2} \Delta P_{G2}]^T \quad (2-23)$$

dengan,

- Δf_1 = Perubahan frekuensi area 1
- ΔP_{m1} = Perubahan daya mekanik area 1
- ΔP_{G1} = Perubahan level katup area 1
- Δf_2 = Perubahan frekuensi area 2
- ΔP_{m2} = Perubahan daya mekanik area 2
- ΔP_{G2} = Perubahan level katup area 2.
- ΔP_{tie} = Perubahan daya pada jaring

Sedangkan input variabel terdiri dari dua masukan yaitu:

$$u(t)=[u_1 \ u_2]^T=[\Delta P_{c1} \ \Delta P_{c2}]^T \quad (2-24)$$

dengan

- ΔP_{c1} = Sinyal masukan yang diumpanbalikkan ke area 1.
- ΔP_{c2} = Sinyal masukan yang diumpanbalikkan ke area 2.

dan sinyal gangguannya dapat ditulis

$$d(t)=[d_1 \ d_2]^T=[\Delta P_{L1} \ \Delta P_{L2}]^T \quad (2-25)$$

dengan,

- ΔP_{L1} = Perubahan beban pada area 1.
- ΔP_{L2} = Perubahan beban pada area 2.

Di dalam LFC, sebuah pengendali area perlu ditambahkan pada sistem, yaitu *Area Control Error (ACE)*, sehingga sistem keluaran dapat ditulis,

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ACE_1 \\ ACE_2 \end{bmatrix} = \mathbf{C}x(t) \quad (2-26)$$

dan

$$ACE_i = \Delta P_{tie} + B_i \Delta f_i \quad i=1,2 \quad (2-27)$$

Notasi $y(t)$ adalah variabel keluaran, ACE_i adalah *kontrol error* pada area i , B_i adalah *frequency bias constant* pada area i , Δf_i adalah perubahan

frekuensi pada area i , sedangkan ΔP_{tie} adalah perubahan daya pada *tie-line*.

Persamaan Matriks Keadaan

Selain itu, kita juga berhasil memperoleh persamaan-persamaan untuk membentuk persamaan matriks keadaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta P_{m1} - \Delta P_{L1} - \Delta P_{tie} &= (sM_1 + D_1)\Delta f_1 \\ \Delta P_{m1} - \Delta P_{L1} - \Delta P_{tie} &= s\Delta f_1 M_1 + \Delta f_1 D_1 \\ \Delta \dot{f}_1 &= \frac{\Delta P_{m1}}{M_1} - \frac{\Delta P_{L1}}{M_1} - \frac{\Delta P_{tie}}{M_1} - \frac{D_1 \Delta f_1}{M_1} \\ \Delta \dot{f}_1 &= \frac{\Delta P_{m1}}{M_1} - \frac{\Delta P_{L1}}{M_1} - \frac{T \Delta \delta_1}{M_1} + \frac{T \Delta \delta_2}{M_1} - \frac{D_1 \Delta f_1}{M_1}\end{aligned}\quad (2-28)$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{m1} &= \frac{1}{1 + sT_{CH1}} \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{m1} + T_{CH1}s\Delta P_{m1} &= \Delta P_{G1} \\ \Delta \dot{P}_{m1} &= \frac{\Delta P_{G1}}{T_{CH1}} - \frac{\Delta P_{m1}}{T_{CH1}}\end{aligned}\quad (2-29)$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{G1} &= \frac{1}{1 + sT_{g1}} \left(\Delta P_{c1} - \frac{\Delta f_1}{R_1} \right) \\ \Delta P_{G1} + T_{g1}s\Delta P_{G1} &= \Delta P_{c1} - \frac{\Delta f_1}{R_1} \\ \Delta \dot{P}_{G1} &= \frac{\Delta P_{c1}}{T_{g1}} - \frac{\Delta f_1}{T_{g1}R_1} - \frac{\Delta P_{G1}}{T_{g1}}\end{aligned}\quad (2-30)$$

$$\begin{aligned}\Delta P_{m2} - \Delta P_{L2} + \Delta P_{tie} &= (sM_2 + D_2)\Delta f_2 \\ \Delta P_{m2} - \Delta P_{L2} + \Delta P_{tie} &= s\Delta f_2 M_2 + \Delta f_2 D_2 \\ \Delta \dot{f}_2 &= \frac{\Delta P_{m2}}{M_2} - \frac{\Delta P_{L2}}{M_2} + \frac{\Delta P_{tie}}{M_2} - \frac{D_2 \Delta f_2}{M_2}\end{aligned}$$

$$\Delta \dot{f}_2 = \frac{\Delta P_{m2}}{M_2} - \frac{\Delta P_{L2}}{M_1} + \frac{T \Delta \delta_1}{M_2} - \frac{T \Delta \delta_2}{M_2} - \frac{D_2 \Delta f_2}{M_2} \quad (2-31)$$

$$\Delta P_{m2} = \frac{1}{1+sT_{CH2}} \Delta P_{G2}$$

$$\Delta P_{m2} + T_{CH2}s\Delta P_{m2} = \Delta P_{G2}$$

$$\Delta \dot{P}_{m2} = \frac{\Delta P_{G2}}{T_{CH2}} - \frac{\Delta P_{m2}}{T_{CH2}} \quad (2-32)$$

$$\Delta P_{G2} = \frac{1}{1+sT_{g2}} \left(\Delta P_{c2} - \frac{\Delta f_2}{R_2} \right)$$

$$\Delta P_{G2} + T_{g2}s\Delta P_{G2} = \Delta P_{c2} - \frac{\Delta f_2}{R_2}$$

$$\Delta \dot{P}_{G2} = \frac{\Delta P_{c2}}{T_{g2}} - \frac{\Delta f_2}{T_{g2}R_2} - \frac{\Delta P_{G2}}{T_{g2}} \quad (2-33)$$

$$\Delta P_{ie} = \frac{T_{I2}}{s} (\Delta f_1 - \Delta f_2)$$

$$\Delta \dot{P}_{ie} = T_{I2} (\Delta f_1 - \Delta f_2) \quad (2-34)$$

Persamaan (2-28) sampai dengan (2-34) dapat disusun menjadi persamaan matriks keadaan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{f}_1 \\ \Delta \dot{P}_{m1} \\ \Delta \dot{P}_{G1} \\ \Delta \dot{P}_{ie} \\ \Delta \dot{f}_2 \\ \Delta \dot{P}_{m2} \\ \Delta \dot{P}_{G2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{1,7} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ a_{7,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & a_{7,7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{m1} \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{ie} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{m2} \\ \Delta P_{G2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ b_{7,1} & b_{7,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{c1} \\ \Delta P_{c2} \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} l_{1,1} & l_{1,2} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ l_{7,1} & l_{7,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{L2} \end{bmatrix}$$

Harga komponen-komponen matriks **A** dapat dilihat di bawah ini, sedangkan untuk harga komponen yang tidak tercantum berharga nol.

$$\begin{aligned} a_{1,2} &= -\frac{D_1}{M_1}; & a_{1,2} &= \frac{1}{M_1}; & a_{1,3} &= -\frac{1}{M_1}; & a_{2,2} &= -\frac{1}{T_{CH1}}; & a_{2,3} &= \frac{1}{T_{CH1}} \\ a_{3,1} &= -\frac{1}{T_{g1} \times R_1}; & a_{3,3} &= -\frac{1}{T_{g1}}; & a_{4,1} &= T_{I2}; & a_{4,5} &= -T_{I2}; & a_{5,4} &= \frac{1}{M_2}; \\ a_{5,5} &= -\frac{D_2}{M_2}; & a_{5,6} &= \frac{1}{M_2}; & a_{6,6} &= -\frac{1}{T_{CH2}}; & a_{6,7} &= \frac{1}{T_{CH2}}; & a_{7,5} &= -\frac{1}{T_{g2} \times R_2}; \\ a_{7,7} &= -\frac{1}{T_{g2}} \end{aligned}$$

Sedangkan untuk harga-harga komponen matriks **B** seperti yang ada di bawah ini, dan harga komponen yang tidak tercantum berharga nol.

$$b_{3,1} = \frac{1}{T_{g1}}; \quad b_{7,2} = \frac{1}{T_{g2}}$$

Kemudian harga-harga komponen matriks **L** (yang tidak tercantum sama dengan nol) adalah,

$$l_{1,1} = -\frac{1}{M_1}; \quad l_{5,2} = -\frac{1}{M_2}$$

Persamaan matriks pengukurannya adalah,

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & c_{2,2} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & c_{6,6} & \cdot \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & c_{7,7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta P_{m1} \\ \Delta P_{G1} \\ \Delta P_{tie} \\ \Delta f_2 \\ \Delta P_{m2} \\ \Delta P_{G2} \end{bmatrix}$$

dengan harga-harga komponen matriks **C** adalah sebagai berikut (yang tidak tercantum berharga nol),

$$c(1,1)=c(2,2)=c(3,3)=c(4,4)=c(5,5)=c(6,6)=c(7,7)=1.$$

Kontroler Integral pada Sistem *Load Frequency Control*

Penguatan kontroler integral K_i yang dipasang pada sistem LFC berfungsi untuk mengontrol sinyal *ACE* pada area ke- i . Sedangkan diagram blok pemasangan kontroler integral pada LFC untuk mengontrol sinyal *ACE* pada sistem tenaga listrik dua area. Kontrol sinyal yang baru akan menjumlahkan deviasi aliran daya *tie-line* dengan deviasi frekuensi yang dikalikan dengan pembobot *faktor bias* B . Penambahan pengendali ini berfungsi untuk mengontrol sinyal *ACE* agar frekuensi *steady-state* menuju nol (nilai nominal).

Kontrol input Δe_1 dan Δe_2 akan menjadi sinyal input untuk ΔP_{c1} dan ΔP_{c2} yang mana dapat ditulis sebagai berikut.

$$\Delta e_i = -\mathbf{K}_{ii} \int ACE_i dt = -\mathbf{K}_{ii} \int (\Delta P_{tie-i} + B_i \Delta f_i) dt \quad (2-34)$$

Jika persamaan (2-34) diturunkan akan menjadi,

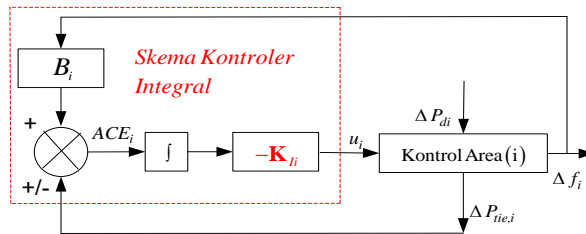
$$\Delta \dot{e}_i = -\mathbf{K}_{ii} (ACE_i) = -\mathbf{K}_{ii} (\Delta P_{tie-i} + B_i \Delta f_i) \quad (2-35)$$

atau dalam bentuk matriks,

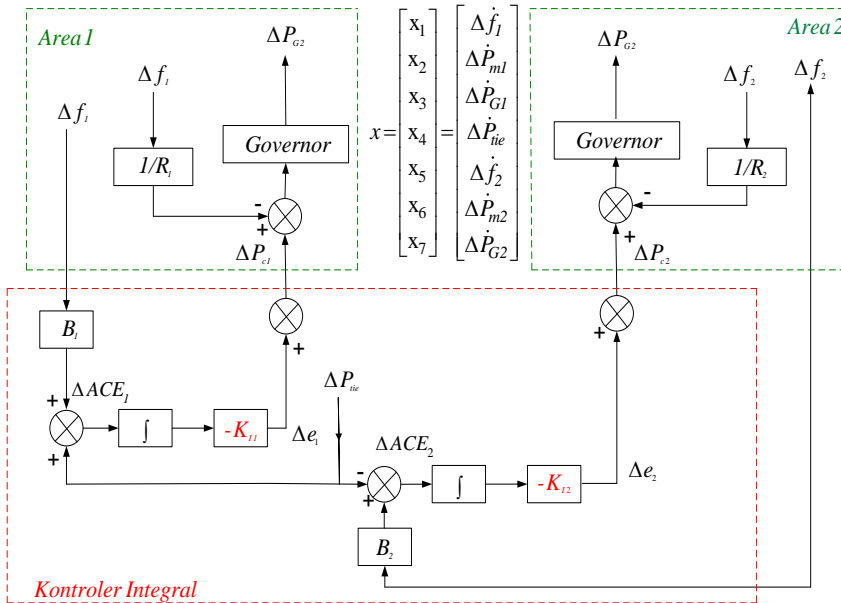
$$\Delta \dot{e}_i = -\mathbf{K}_{ii} \mathbf{C}x \quad (2-36)$$

dengan,

$$\mathbf{K}_I = \begin{bmatrix} k_{I1} & 0 \\ 0 & k_{I2} \end{bmatrix} \quad (2-37)$$



(a) Kontroler Integral dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik area ke -i



(b) Kontroler Integral dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik dua area [3]

Gambar 2.19 Aplikasi Kontroler Integral pada Sistem LFC Sistem Tenaga Listrik

Menggunakan persamaan (2-36) dan (2-21) dapat terbentuk persamaan keadaan yang baru sebagai berikut.

$$\dot{x}_N = \mathbf{A}_N x_N + \mathbf{L}_N d \quad (2-38)$$

$$x_N = \begin{bmatrix} x \\ e \end{bmatrix}, \mathbf{A}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ -\mathbf{K}_I \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{L}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

Kontroler PI pada Sistem *Load Frequency Control*

Aplikasi Kontroler PI pada LFC merupakan bagian dari pengembangan skema pengaruh perubahan beban pada area 1. Penguatan kontroler integral \mathbf{K}_I dan kontroler *proportional* \mathbf{K}_p berguna untuk mengontrol sinyal *Area Control Error* (ACE). Variabel keadaan baru $z(t)$ ditambahkan sebagai *state* untuk penguatan kontroler integral \mathbf{K}_I . Sedangkan Variabel keadaan baru $v(t)$ ditambahkan sebagai *state* untuk penguatan kontroler *proportional* \mathbf{K}_p . Diagram blok pemasangan kontroler integral dan kontroler *proportional* pada LFC untuk mengontrol sinyal ACE pada sistem tenaga listrik dua area yang secara visual dapat dilihat pada gambar tentang Aplikasi Kontroler Integral pada sistem LFC sistem tenaga listrik.

Kontroler penguatan integral pada skema pengaruh perubahan beban pada area 1 dituliskan sebagai berikut.

$$\mathbf{K}_I = \begin{bmatrix} k_{I1} & 0 \\ 0 & k_{I2} \end{bmatrix} \quad (2-40)$$

Variabel baru $z(t)$ dan $v(t)$ untuk ACE menambahkan Persamaan (2-41) untuk memecahkan permasalahan yang dituliskan dalam persamaan variabel keadaan baru sebagai berikut,

$$\dot{x}_N(t) = \mathbf{A}_N x_N(t) + \mathbf{B}_N u(t) + \mathbf{L}_N d(t) \quad (2-41)$$

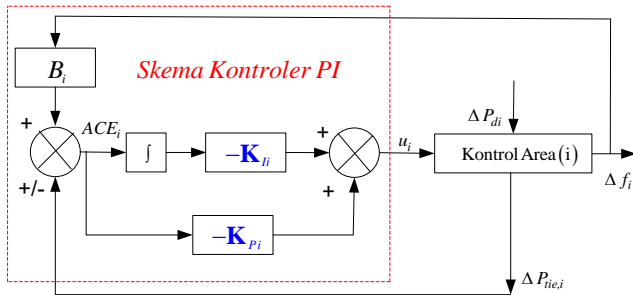
$$y_N(t) = \mathbf{C}_N x_N(t) \quad (2-42)$$

dengan,

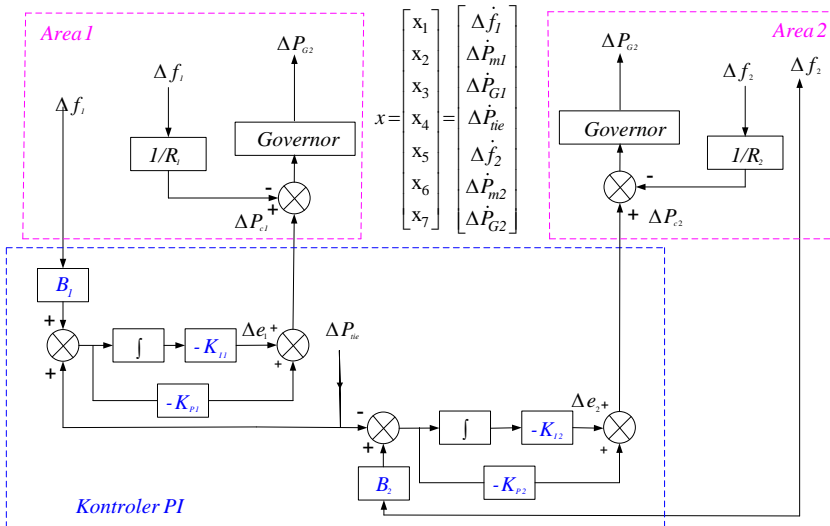
$$x_N(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ z(t) \end{bmatrix}; y_N(t) = \begin{bmatrix} y(t) \\ z(t) \end{bmatrix}; z(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix}$$

$$z_1(t) = \int ACE_1 dt \text{ dan } z_2(t) = \int ACE_2 dt$$

$$v_1(t) = ACE_1(t) \text{ dan } v_2(t) = ACE_2(t) \quad (2-43)$$



(a) Kontroler PI dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik area ke-i.



(b) Kontroler PI dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik dua area

Gambar 2.20 Aplikasi Kontroler PI pada Sistem LFC Sistem Tenaga Listrik

$$\mathbf{A}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & 0 \\ \mathbf{C} & 0 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{L}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{L} \\ 0 \end{bmatrix}; \mathbf{C}_N = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \end{bmatrix} \quad (2-52)$$

Sinyal kontrol $\otimes P_c$ dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{p1} & 0 \\ 0 & k_{p2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_2 \end{bmatrix} \quad (2-44)$$

Menggunakan Persamaan (2-40) dan (2-43), Persamaan (2-44) dituliskan sebagai berikut,

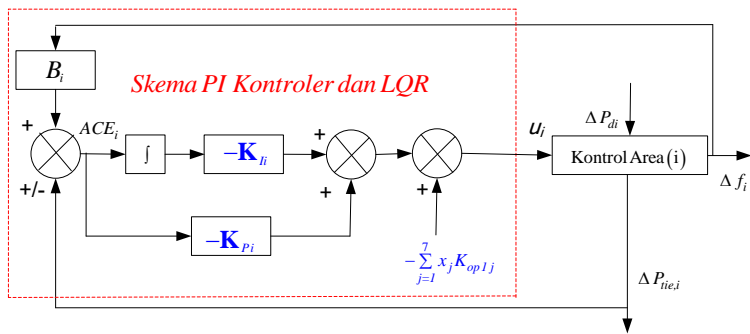
$$\begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} = \mathbf{u} = -\mathbf{K}_P \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I1} & 0 \\ 0 & k_{I2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} \quad (2-45)$$

atau

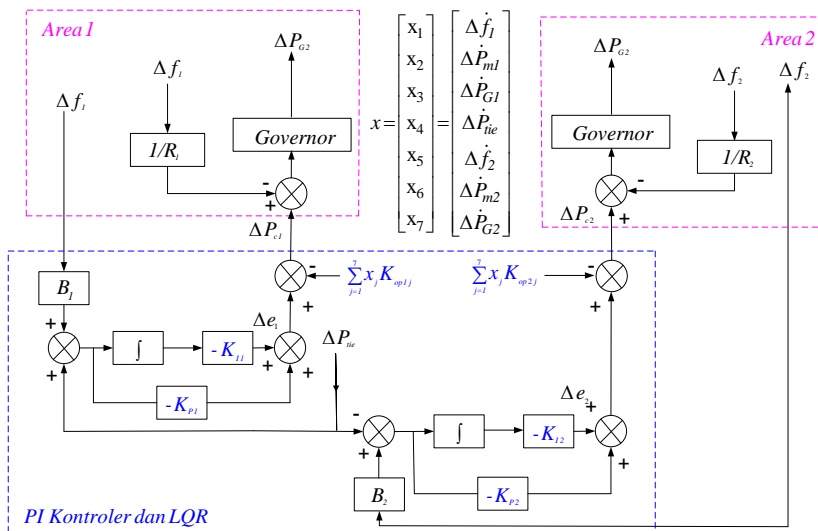
$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_P \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_I \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} \quad (2-46)$$

Kontroler PI dan Kontrol Optimal LQR pada Sistem Load Frequency Control

Aplikasi kontroler PI dan kontrol optimal pada sistem LFC merupakan pengembangan dari gambar tentang Aplikasi Kontroler Integral pada sistem LFC sistem tenaga listrik. Penambahan penguatan \mathbf{K}_{op} kontrol optimal LQR dilakukan untuk menambah efek redaman pada sistem sehingga didapatkan respons dinamik sistem yang optimum. Diagram blok aplikasi kontroler PI untuk mengontrol sinyal ACE_i dan penguatan \mathbf{K}_{op} kontrol optimal pada sistem tenaga listrik dua area divisualisasikan pada gambar di bawah ini. Sinyal kontrol ΔP_{ci} pada persamaan (2-45) akan menjadi seperti pada persamaan (2-48).



(a) Kontroler PI dan kontrol optimal LQR dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik area ke $-i$.



(b) Kontroler PI dan kontrol optimal LQR dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik dua area

Gambar 2.21 Aplikasi Kontroler PI dan Kontrol Optimal LQR pada Sistem LFC Sistem Tenaga Listrik

Sinyal kontrol $\otimes P_c$ dapat dituliskan sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} k_{P1} & 0 \\ 0 & k_{P2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta e_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^7 x_j k_{P1j} \\ \sum_{j=1}^7 x_j k_{P2j} \end{bmatrix} \quad (2-47)$$

Dengan menggunakan Persamaan (2-40) dan (2-43), maka Persamaan (2-47) dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{C1} \\ \Delta P_{C2} \end{bmatrix} = u = -\mathbf{K}_P \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} k_{I1} & 0 \\ 0 & k_{I2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_{opt} x \quad (2-48)$$

atau

$$u = -\mathbf{K}_P \begin{bmatrix} v_1(t) \\ v_2(t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_I \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} - \mathbf{K}_{opt} x \quad (2-49)$$

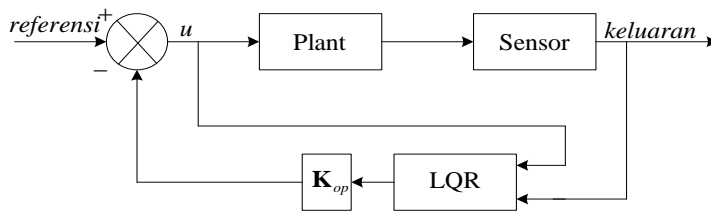
Kontrol Optimal *Linear Quadratic Regulator (Lqr)*, *Fuzzy Logic Controller (Flc)*, dan *Artificial Immune System (Ais)* via *Clonal Selection*

Kontrol Optimal LQR

Sejak awal, sistem kontrol disusun dan didesain berdasarkan kawasan frekuensi dan waktu. Pengembangan konsep stabilitas sistem banyak memperoleh kemajuan berdasarkan dua kawasan tersebut. Contohnya adalah konsep kestabilan Lyapunov yang diperkenalkan pada tahun 1890, Routh dan Hurwitz pada tahun 1877, dan Nyquist pada tahun 1932. Saat itu desain kontroler dan filter sudah mulai berkembang, namun dilakukan secara terpisah [3].

Konsep optimalitas dalam teori sistem pertama kali dikenalkan oleh Wiener [6], yakni tentang estimator linier yang optimal pada tahun 1942. Secara matematik hasil tersebut sangat baik, namun sulit untuk diwujudkan secara praktis. Karena itulah dilakukan memanipulasi estimator Wiener dengan mengambil bagian yang dapat diwujudkan. Namun cara ini akan dapat mengurangi bobot estimator Wiener.

Pada tahun 1960an, Kalman dan Gilbert melakukan sebuah riset tentang pendekatan ruang menjadi titik awal tentang analisis berbagai proses linear multivariabel. Dari hasil tersebut kemudian muncul konsep optimalitas sistem multivariabel yang berdasarkan indeks kinerja kuadratis untuk kasus deterministik yang disebut *Linear Quadratic Regulator* (LQR). Aplikasi kontrol optimal LQR dapat direpresentasikan dalam bentuk diagram blok seperti gambar berikut.



Gambar 2.22 Diagram blok sistem kontrol optimal LQR

Gambar di atas menunjukkan, bahwa untuk mendapat sinyal kontrol u , diperlukan penguat kontroler K_{op} yang didapat dari metode LQR. Untuk menjaga sistem tetap stabil diperlukan kontroler yang stabil.

Penjelasan *Linear Quadratic Regulator* [3,7]

Sistem linier invarian waktu pada suatu sistem dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$\dot{x}(t) = \mathbf{A} x(t) + \mathbf{B} u(t) \tag{3-1}$$

$$y(t) = \mathbf{C} x(t) \tag{3-2}$$

dengan,

$x(t)$: vektor variabel keadaan, $\in \mathfrak{R}^n$

$u(t)$: vektor masukan, $\in \mathfrak{R}^m$

$y(t)$: vektor pengamatan, $\in \mathfrak{R}^r$

$\mathbf{A} \in \mathfrak{R}^n, \mathbf{B} \in \mathfrak{R}^m, \mathbf{C} \in \mathfrak{R}^r$

Usaha-usaha optimisasi dilakukan pada suatu sistem dengan cara mencari harga indeks kinerja sistem tersebut seminimum mungkin. Indeks kinerja suatu sistem dapat ditulis sebagai berikut.

$$J(t_0) = \Phi(x(T), T) + \int_{t_0}^T L(x, u, t) dt \quad (3-3)$$

Notasi $\Phi(x(T), T)$ artinya keadaan akhir fungsi pembobot yang dipilih untuk menghasilkan indeks kinerja minimum dan $L(x, u, t)$ adalah fungsi pembobot. Optimasi energi atau waktu dilakukan dengan cara menekan besarnya simpangan dan energi sinyal kontrol sekecil mungkin. Dalam hal ini kita perlu menggunakan kriteria kuadratik, sehingga indeks kinerjanya dapat ditulis sebagai berikut.

$$J(t_0) = \frac{1}{2} x^T(T) S(T) x(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (3-4)$$

Notasi t_0 merupakan kondisi awal sistem, $S(T) \geq 0$ (semidefinit positif), $Q \geq 0$ (semidefinit positif) dengan $Q^{n \times n}$, $R > 0$ (definit positif) dengan $R^{m \times m}$. $S(T)$, Q , dan R adalah matriks bobot yang berbentuk simetris. Untuk menyelesaikan Persamaan (3-4) digunakan persamaan fungsi Hamiltonian yang besarnya,

$$H(x, u, t) = L(x, u, t) + \lambda^T f(x, u, t) \quad (3-5)$$

Sehingga dari persamaan (3-1), (3-2), dan (3-4) diperoleh Hamiltonian,

$$H(t) = \frac{1}{2} (x^T Q x + u^T R u) + \lambda^T (A x + B u) \quad (3-6)$$

λ^T adalah pengali Lagrange. Dari persamaan (3-6) maka diperoleh persamaan keadaan dan ko-keadaannya sebagai berikut.

$$\dot{x} = \partial H / \partial \lambda = A x + B u \quad (3-7)$$

$$-\dot{\lambda} = \partial H / \partial x = Q x + A^T \lambda \quad (3-8)$$

Untuk menghasilkan sinyal kontrol (masukan) yang optimal maka,

$$\partial H / \partial u = R u + B^T \lambda = 0 \quad (3-9)$$

sehingga,

$$u = -R^{-1} B^T \lambda(t) \quad (3-10)$$

u adalah sinyal kontrol optimal dengan,

$$\lambda(T) = \partial \Phi / \partial x|_T = S(T) x(T) \quad (3-11)$$

Untuk $t \in [t_0, T]$ maka,

$$\lambda(t) = S(t) x(t) \quad (3-12)$$

Jika Persamaan (3-12) diturunkan terhadap waktu maka,

$$\dot{\lambda} = \dot{S}x + S\dot{x}$$

$$= \dot{S}x + S(Ax - BR^{-1}B^T Sx) \quad (3-13)$$

$$-\dot{S}x = (A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q)x \quad (3-14)$$

$$-\dot{S} = A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q$$

$$0 = A^T S + SA - SBR^{-1}B^T S + Q \quad (3-15)$$

Persamaan (3-15) dinamakan solusi Ricatti.

Dari Persamaan (3-9) dan (3-10), maka kita dapat definisikan sebagai penguatan Kalman sebesar,

$$\mathbf{K}_{OP}(t) = R^{-1} B^T S(t), \in \mathfrak{R}^{m \times n} \quad (3-16)$$

sehingga,

$$u(t) = -\mathbf{K}_{OP}(t) x(t) \quad (3-17)$$

Untuk sistem *loop* tertutup, persamaan matriks keadaan sistem menjadi,

$$\dot{x}(t) = (A - \mathbf{BK}_{OP}) x \quad (3-18)$$

Pada matriks sistem *loop* tertutup, persamaan Ricatti menjadi sebagai berikut dalam *Joseph stabilized formulation*,

$$-\dot{S} = (\mathbf{A} - \mathbf{BK}_{OP})^T S + S(\mathbf{A} - \mathbf{BK}_{OP}) + \mathbf{K}_{OP}^T \mathbf{R} \mathbf{K}_{OP} + \mathbf{Q}, t \leq T \quad (3-19)$$

dan,

$$J(t) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t) S(t) \mathbf{x}(t) + \frac{1}{2} \int_t^T \left\| \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T S \mathbf{x} + \mathbf{u} \right\|_{\mathbf{R}}^2 dt \quad (3-20)$$

Dengan memasukkan Persamaan (3-16) dan (3-17), maka indeks kinerjanya pada $[t, T]$ menjadi,

$$J(t) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T(t) S(t) \mathbf{x}(t) \quad (3-21)$$

Penentuan Matriks Pembobot [3]

Matriks pembobot pada indeks performansi dipilih menentukan performansi desain kontrol. Berikut merupakan beberapa metode untuk menentukan besar matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} .

Metode *Trial-Error*

Metode ini sangat sederhana dan praktis, yang dilakukan dengan memilih komponen matriks dengan cara mencoba harga sembarang sesuai keluaran yang diinginkan dibandingkan keluaran sebelumnya. Dengan mengetahui permodelan dari sistem, kita akan memperoleh persamaan ruang keadaan, parameter sistem pada \mathbf{A} , variabel keadaan sistem $\mathbf{x}(t)$, dan parameter masukan pada \mathbf{B} . Langkah selanjutnya adalah sebagai berikut.

1. Memilih nilai matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} dengan memberikan harga sembarang.
2. Menyelesaikan Persamaan Riccati, $\mathbf{A}^T S + S \mathbf{A} - S \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T S + \mathbf{Q} = 0$.
3. Jika respons dan keluaran sistem tidak optimal, masukkan nilai \mathbf{Q} dan \mathbf{R} seperti langkah (1) hingga diperoleh respons waktu keluaran yang diinginkan dengan indeks performansi yang minimal.

Metode Bryson

Metode ini mengasumsikan bahwa matriks pembobot $\mathbf{Q} \in \mathcal{R}^{n \times n}$ dan $\mathbf{R} \in \mathcal{R}^{m \times m}$ adalah matriks diagonal.

Algoritma metode Bryson adalah sebagai berikut.

1. Menentukan deviasi maksimal yang diizinkan.
 $x_i(\text{maks}), i = 1, \dots, n$
 $u_j(\text{maks}), j = 1, \dots, m$
2. Menentukan komponen matriks pembobot.

$$q_i = \frac{1}{x_1^2(\text{maks})} \Bigg]_{i=1}^n \quad (3-22)$$

$$r_j = \frac{1}{u_1^2(\text{maks})} \Bigg]_{j=1}^m \quad (3-23)$$

Metode Eksak

Metode ini merupakan pengembangan dari metode pemindahan *pole* yakni dengan menentukan nilai *eigen* sistem lingkaran tertutup. Algoritma metode Eksak dapat dijelaskan sebagai berikut.

Inisialisasi, $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_0; k = k_0; k = \text{indeks iterasi} = 0, \mathbf{R} > 0$

1. Memperbaiki matriks sistem,

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K} \quad (3-24)$$

2. Menghitung nilai *eigen* dan vektor *eigen*.

$$\mathbf{A}_k = \text{diag} \{ \lambda_1, \dots, \lambda_n \}$$

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$: nilai *eigen*

$$\mathbf{T}_k = [t_1, \dots, t_n], \in \mathcal{R}^{n \times n}$$

t_1, \dots, t_n : vektor *eigen*

$$\text{dan } \mathbf{H} = \mathbf{T}_k^{-1} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T [\mathbf{T}_k^{-1}]^T \quad (3-25)$$

3. $k = k + 1$
4. Menggeser λ_i ke lokasi s_i .

$$\bar{q}_i^k = \frac{s_i^2 - \lambda_i^k}{h_{ii}^{k-1}} \quad (3-26)$$

h_{ii} : harga komponen diagonal matriks H .

$$5. \quad \bar{Q}_k = \text{diag}\{0, 0, \dots, q_i^k, 0, \dots, 0\}$$

$$\bar{P}_k A_{k-1} + A_{k-1} \bar{P}_k - \bar{P}_k \bar{B}_k R^{-1} (\bar{B}_k)^T P_k \bar{Q}_k = 0 \quad (3-27)$$

$$K_k = \bar{K}_k T_k^{-1} (\bar{K}_k = R^{-1} (\bar{B}_k)^T) \bar{P}_k \quad (3-28)$$

$$6. \quad K: = K + K_k \quad (3-23)$$

$$Q_k = T_k^{-T} \bar{Q}_k T_k^{-1} \quad (3-29)$$

$$Q: = Q + Q_k \quad (3-30)$$

Dari pembahasan LQR di atas, maka kita dapat menyusun dalam bentuk tabel sebagai berikut.

Tabel 2.1 Linier Quadratic Regulator

Keterangan	Persamaan LQR
Model Sistem	$\dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t), \quad t > t_0$
Indeks kinerja	$J(t_0) = \frac{1}{2} x^T(T)S(T)x(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [x^T(t)\mathbf{Q}x(t) + u^T(t)\mathbf{R}u(t)]dt$
Asumsi	$S(T) \geq 0, \mathbf{Q}(T) \geq 0, \mathbf{R} > 0,$ dalam bentuk matriks simetris
Kontrol umpan balik optimal	$-\dot{S} = \mathbf{A}^T S + \mathbf{S}\mathbf{A} - \mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T S + \mathbf{Q}$ $\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^T S$ $u = -\mathbf{K}x$ $J(t_0) = \frac{1}{2} x^T(t_0)S(t_0)x(t_0)$

Fuzzy Logic Controller (FLC)

Teori *Fuzzy* pertama kali dikenalkan oleh Lofti Zadeh pada tahun 1965, yakni melalui *seminar work "Fuzzy Sets"* di dalam jurnal *Information and Control* [8]. Sejak saat itu, banyak perkembangan teoretis dalam logika *fuzzy* di seluruh dunia yang dikembangkan oleh ahli matematika, ilmuwan, dan insinyur. Saat ini, *fuzzy* banyak digunakan untuk berbagai macam penelitian, yang secara prinsip teori ini mampu mengatasi kekurangan yang dimiliki oleh teori Boolean.

Teori Boolean hanya mengenal dua keadaan yaitu 0 dan 1, besar dan kecil, panjang atau pendek. Sehingga hanya dapat diketahui nilai ekstrem suatu kondisi. Padahal terkadang dibutuhkan keadaan yang benar-benar mempresentasikan kondisi sesungguhnya. Teori *fuzzy* memberikan solusi dari masalah ini. Teori *fuzzy* mendefinisikan keadaan dalam himpunan yang kontinyu dari 0 sampai 1. Meskipun begitu, himpunan *fuzzy* belum dapat dimanfaatkan hingga pertengahan tujuh puluhan. Prof. Ebrahim Mamdani dari Queen Mary College di London merancang sebuah pengendali *fuzzy* untuk mesin uap dan tangki pencampur, sejak saat itu *fuzzy* mempunyai arti penting dalam menangani masalah-masalah yang kompleks. Penerapan himpunan *fuzzy* dalam bidang pengendalian sudah terbukti mampu menyelesaikan masalah-masalah yang ditemui di bidang pengendalian. Penerapan kontroler *fuzzy* dalam industri-industri banyak dipelopori oleh para ahli Jepang, seperti Prof. Sugeno dan kawan-kawannya. Mereka merupakan ilmuwan dari Tokyo Institute of Technology yang melakukan penelitian dasar komputer *fuzzy*, serta Togai dan Watanabe dari Bell Telephone Labs berhasil menciptakan chip logika *fuzzy* untuk pertama kalinya.

Himpunan *Crisp* dan Himpunan *Fuzzy*

Dalam rangka memberikan suatu semesta pembicaraan, himpunan '*crisp*' A didefinisikan dengan mengidentifikasi yang memuat *item* tersebut. Masing-masing *item* dalam semesta yang lain termasuk di dalam himpunan atau tidak. Fungsi karakteristik X_A suatu pemberian tiap-tiap *item* pada semesta merupakan suatu nilai yang saling berhubungan

antara 1 dan 0. Sifat '*crisp*' biasanya berarti fungsi. Di dalam kasus ini, salah satu nilai yang diberikan tiap-tiap *item* dalam semesta ialah "benar" dan untuk kasus yang bukan termasuk sifat tersebut mempunyai sifat nilai 'salah'.

Himpunan '*fuzzy*' didasarkan pada batas penalaran dari karakteristik fungsi sehingga fungsi tersebut meliputi bilangan riil antara [0,1]. Nilai keanggotaan yang diberikan untuk *item* tertentu di alam semesta tidak selamanya terbatas pada dua kemungkinan tertentu, namun bisa bernilai 0,1 atau berbagai nilai di antaranya [8,9].

Konsep Fuzzy Logic Controller

Fuzzy Logic Controller (FLC) merupakan metodologi kontrol yang menggunakan metode uraian manusia dari kontrol sistem fisik dan strategi agar bisa ditirukan dalam suatu langkah yang alami [8,9].

Konsep teori himpunan *fuzzy* didasarkan pada pengelompokan elemen-elemen ke dalam kelas-kelas yang mempunyai batas samar. Metode-metode perancangan FLC menggabungkan aspek pendefinisian himpunan *fuzzy* untuk memperoleh kontroler tertentu yang mampu menampilkan cara kerja operator manusia. Dengan prosedur perancangan tertentu, kedua aspek diaplikasikan pada suatu masukan dan keluaran untuk memberikan hasil perancangan berupa algoritma aturan *fuzzy*. Di beberapa penerapan kontroler *fuzzy* menggunakan *rule-rule* yang telah baku. Salah satunya adalah bentuk intuitif.

Kontroler *fuzzy* secara umum mempunyai keunggulan sebagai berikut.

1. Mampu beroperasi tanpa campur tangan manusia secara langsung, namun memiliki efektifitas yang sama dengan kontroler manusia.
2. Mampu menangani sistem-sistem yang kompleks, nonlinier, dan juga tidak stasioner.
3. Memiliki spesifikasi dan kriteria operasional.
4. Memiliki struktur yang sederhana, kuat dan mampu beroperasi *real time*.

Operasi pada Himpunan Fuzzy

Operasi dasar yang berlaku di dalam himpunan fuzzy A dan B dari semesta X dengan tingkat keanggotaan $\mu_A(x)$ dan $\mu_B(x)$ untuk $x \in X$ adalah sebagai berikut.

1. Dua himpunan fuzzy A dan B dikatakan sama ($A = B$) apabila keduanya memiliki semesta yang sama dengan fungsi keanggotaan yang sama. Persamaan yang representatif dengan kondisi ini adalah sebagai berikut.

$$\mu(x_A)/x = \mu_B(x)/x; x \in X \quad (3-31)$$

2. Gabungan dari himpunan fuzzy A dan B ($A \cup B$), dinyatakan sebagai berikut.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)); x \in X \quad (3-32)$$

Ini dinyatakan dengan operasi `OR` dalam logika fuzzy.

3. Irisan dari himpunan fuzzy A dan B ($A \cap B$) dinyatakan sebagai berikut.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)); x \in X \quad (3-33)$$

Ini dinyatakan dengan operasi `AND` dalam logika fuzzy.

4. Komplemen himpunan fuzzy A dinotasikan dengan \bar{A} , yang didefinisikan sebagai berikut.

$$\mu_{\bar{A}}(x) = (1 - \mu_A(x)); x \in X \quad (3-34)$$

Ini dinyatakan dengan operasi `NOT` dalam logika fuzzy.

Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Himpunan Fuzzy

Untuk menyatakan antara input tertentu dengan sebuah himpunan fuzzy, digunakan fungsi keanggotaan (*Membership Function*). Ada beberapa jenis fungsi keanggotaan, namun yang sering digunakan ialah fungsi segitiga dan fungsi trapesium dengan definisi sebagai berikut.

Definisi secara Numerik

Membership Function yang didefinisikan secara numerik melibatkan pendukung diskrit. Ia juga bisa menggunakan nilai keanggotaan dari bentuk fungsi dengan cara mengambil nilai bentuk fungsi untuk tiap pendukung X yang berhingga jumlahnya. Misalnya,

$$X=7, 8, 9, 10, 11$$

$$\mu_F(x)=0.5, 0.3, 1.5, 0.6, 0.8 \quad (3-35)$$

maka himpunan yang didefinisikan untuk himpunan elemen X di atas adalah sebagai berikut.

$$F=0.5/7, 0.3/8, 1.5/9, 0.6/10, 0.8/11 \quad (3-36)$$

Definisi secara Fungsional

Membership Function yang didefinisikan dalam bentuk fungsi menggunakan pendukung kontinyu. Terdapat beberapa fungsi yang dapat digunakan dalam himpunan *fuzzy*, namun yang sering digunakan adalah sebagai berikut.

- a. Fungsi Segitiga

$$\mu_F(x) = f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}; & b \leq x \leq c \\ 0; & c \leq x \end{cases} \quad (3-37)$$

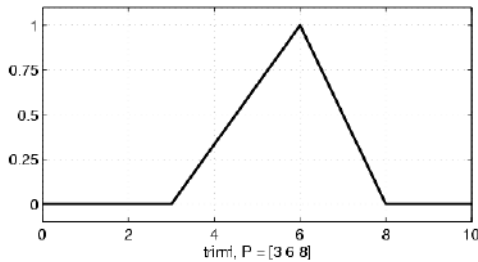
atau

$$\mu_F(x) = f(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (3-38)$$

Parameter a dan c menyatakan “kaki” dari segitiga, sedangkan b menyatakan “puncak” dari segitiga. Contohnya adalah sebagai berikut.

```
x=0:0.1:10;
y=trimf(x,[3,6,8]);
plot(x,y)
xlabel('trimf, P=[3 6 8]')
```

Selanjutnya ialah diperoleh hasil plot sesuai yang ditunjukkan seperti gambar berikut.



Gambar 2.23 Fungsi Segitiga

b. Fungsi Trapezium

$$\mu_F(x) = f(x, a, b, c) = \begin{cases} 0; x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; a \leq x \leq b \\ 1; b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}; c \leq x \leq d \\ 0; d \leq x \end{cases} \quad (3-39)$$

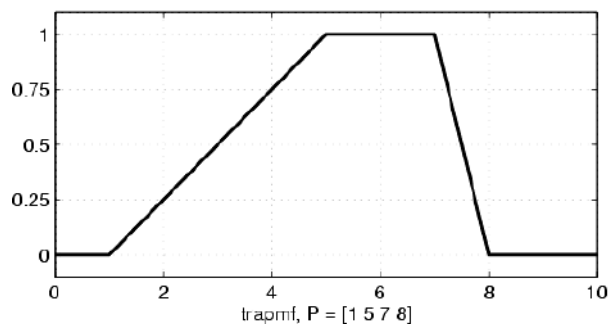
atau

$$\mu_F(x) = f(x, a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (3-40)$$

Parameter a dan d menyatakan “kaki” dari trapesium, sedangkan b dan c menyatakan “bahu” dari trapesium. Contohnya adalah sebagai berikut.

```
x=0:0.1:10;  
y=trapmf(x,[1 5 7 8]);  
plot(x,y)  
xlabel('trapmf, P=[1 5 7 8]')
```

Sehingga akan diperoleh hasil plot sesuai yang ditunjukkan gambar berikut.



Gambar 2.24 Fungsi Trapesium

Pengaturan *Fuzzy Logic*

Di dalam pengaturan *Fuzzy Logic*, pengendalian dilakukan oleh sistem pakar berbasis *Fuzzy Logic*, yakni semacam model berpikir logika yang mirip dengan cara manusia mengambil keputusan. Pada dasarnya pengatur *Fuzzy Logic* ialah metode-metode pengaturan yang menerapkan cara berpikir manusia di mana ketidakpastian pada sistem-sistem fisik dilibatkan di dalamnya. Pengatur *Fuzzy Logic* membuat keputusan sebagai sinyal alur yang didasarkan pada masukan dan keluaran sebelumnya berupa *variable linguistic*, dengan menggunakan aturan yang dijabarkan secara umum dalam bentuk:

If e and de, then u

dengan,

e : *error output system*

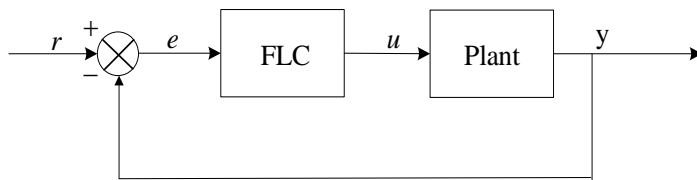
de : perubahan kesalahan *output system*

u : sinyal alur

Aturan logika pada strategi kontrol dapat dibuat dengan bebas selama aturan-aturan tersebut menjamin konsekuensi logis di antara hubungan-hubungan antarvariabel di dalamnya. *Error* (e) dan perubahan *error* (de) objek atur/sistem merupakan masukan bagi kontroler *Fuzzy Logic* (*Fuzzy Logic Controller* atau FLC) dan sinyal atur (u) FLC merupakan masukan bagi *system/plant*.

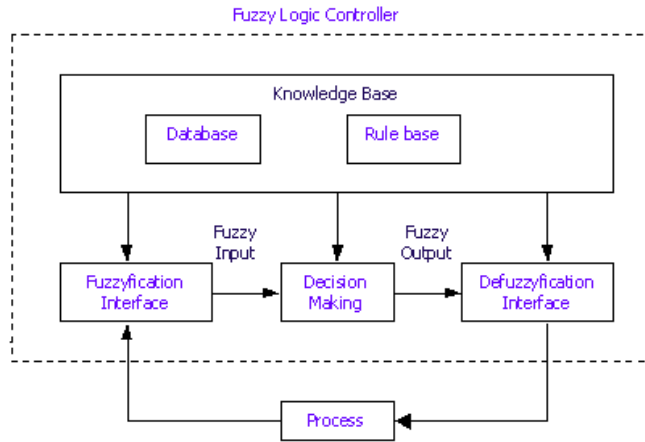
Struktur Dasar FLC

Fuzzy Logic Controller (FLC) dapat berbentuk sistem *loop* tertutup seperti gambar berikut.



Gambar 2.25 Aplikasi *Fuzzy Logic Controller* (FLC) pada *Plant*

Variabel sistem terdiri dari dua macam, yakni *variable input* (E) yang diukur dari proses kontrol dan *variable output* (U) yang digunakan oleh FLC untuk proses kontrol. Struktur dasar *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dapat ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.26 Struktur Dasar FLC

Penjelasan fungsi pada struktur dasar FLC yang ditunjukkan adalah sebagai berikut.

1. **Modul Fuzzifikasi**, yang mana fungsinya untuk membaca, mengukur, dan menskalakan variabel kontrol (misalnya kecepatan, akselerasi, dan lain-lain). Selain itu, bagian struktur ini juga berfungsi untuk mentransformasikan nilai numerik yang diukur ke suatu variabel linguistik (*fuzzy*) dengan nilai *membership* tertentu.
2. **Knowledge Base**, merupakan *database* dan *rule base*, yang mendefinisikan setiap variabel kontrol dan menyatakan *rule-rule* yang sesuai dengan tujuan kontrol dengan variabel linguistik.
3. **Mekanisme Inference**, merupakan bagian utama (*kernel*) FLC yang merupakan tempat terjadinya pengambilan keputusan yang mempengaruhi aksi kontrol yang berdasarkan *Fuzzy Logic*.
4. **Modul Defuzzifikasi**, yang mengubah variabel linguistik kembali ke nilai numerik.

Fuzzifikasi

Fuzzifikasi merupakan pemetaan nilai masukan *non-fuzzy* (*crisp*) ke dalam bentuk *fuzzy*. Hal ini terjadi karena di dalam penerapan suatu

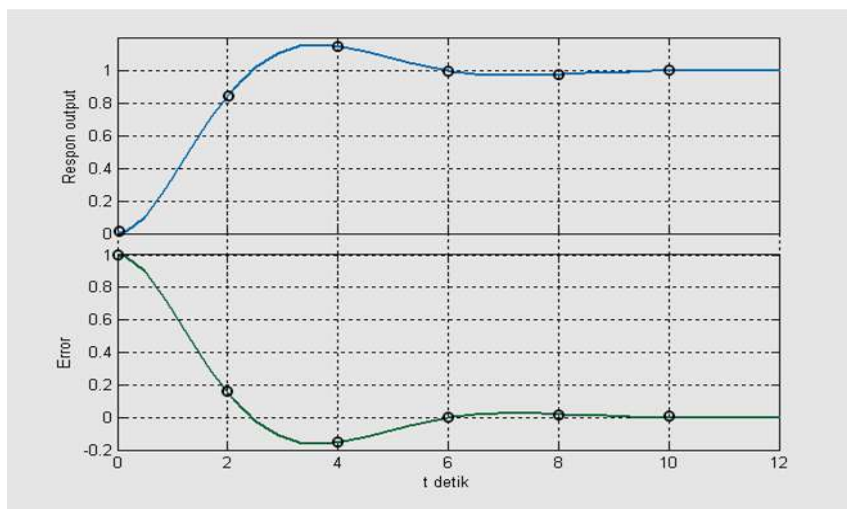
sistem kontrol, besaran masukan yang diperoleh dari *plant* akan selalu berupa data-data *non-fuzzy (crisp)* yang dianggap pasti dan kuantitatif. Sementara pengolahan data dalam FLC didasarkan pada teori himpunan *fuzzy* dengan *variable linguistic* yang bersifat *fuzzy* sehingga pada tahap awal FLC diperlukan fuzzifikasi yang dilakukan oleh *fuzzifier*. Secara umum pemetaan ini dinyatakan sebagai berikut.

$$x = \text{fuzzifier}(x_0) \quad (3-41)$$

Notasi x_0 adalah harga *crisp* dari variabel input pada proses; x adalah vektor *fuzzy set* yang didefinisikan untuk variabel; dan *fuzzier* adalah operator fuzzifikasi yang memetakan data *crisp* ke himpunan *fuzzy*.

Rule Base - Medan Operasi

Rule base dapat didefinisikan secara *verbal* dengan menggunakan logika bahasa. Berikut gambar respons *output* dan *error plant* yang dapat diperhatikan secara lebih detail.



Gambar 2.27 Respons *Output* dan *Error Plant*

Dari Gambar 3.6 di atas, *rule base* yang didapatkan sebagai berikut,

1. Respons bermula pada $t = 0$, di mana *error* pada waktu tersebut adalah “*Positif Besar*”. Artinya, untuk mencapai respons *output* pada $t = 2$ diperlukan sinyal kontrol “*Positif Besar*”. *Rule* yang diperoleh adalah, *Jika eF = “PB” maka uF = “PB”*.
2. Pada $t = 2$, di mana *error* pada waktu tersebut adalah “*Positif Kecil*”. Artinya, untuk mencapai respons *output* pada $t = 4$ diperlukan sinyal kontrol “*Positif Kecil*”. *Rule* yang diperoleh adalah, *Jika eF = “PK” maka uF = “PK”*.
3. Pada $t = 4$, di mana *error* pada waktu tersebut adalah “*Negatif Kecil*”. Artinya, untuk mencapai respons *output* pada $t = 6$ diperlukan sinyal kontrol “*Negatif Kecil*”. *Rule* yang didapatkan adalah, *Jika eF = “NK” maka uF = “NK”*.
4. Pada $t = 6$, di mana *error* pada waktu tersebut adalah “*Sekitar Nol*”. Artinya, untuk mencapai respons *output* pada $t = 8$ diperlukan sinyal kontrol “*Sekitar Nol*”. *Rule* yang didapatkan adalah, *Jika eF = “SN” maka uF = “SN”*.

Untuk satu *input* fuzzifikasi seperti kasus di atas, maka *Rule base* satu dimensi yang diperoleh adalah sebagai berikut.

Tabel 2.2. *Rule base* satu dimensi

Jika eF	NB	NK	SN	PK	PB
Maka uF	NB	NK	SN	PK	PB

Dari *rule base* tersebut, dengan harga fuzzifikasi *error* (eF) tertentu, maka akan diperoleh harga fuzzifikasi untuk sinyal kontrol u (uF). Contohnya adalah untuk nilai eF ,

$$E_F = [0;0;0;0;0.6;0.4;0]$$

Selanjutnya nilai fuzzifikasi uF yang didapatkan adalah sebagai berikut.

$$U_F = [0;0;0;0;0.6;0.4;0]$$

Defuzzifikasi Sinyal Kontrol

Agar harga *crisp* dari besaran *fuzzy* dapat berubah, maka dibutuhkan proses defuzzifikasi. Proses ini merupakan konversi dari harga-harga *fuzzy* menjadi harga *crisp* yang dibutuhkan oleh aktuator atau kontroler. Proses ini terbilang sangat penting untuk menghasilkan harga *crisp* yang dibutuhkan oleh sistem. Harga-harga *fuzzy* hanya dibutuhkan pada proses penyelesaian *fuzzy*. Proses defuzzifikasi bergantung pada *output* himpunan *fuzzy* yang dibangkitkan dari aturan-aturan *fuzzy*. Ada beberapa metode defuzzifikasi yang dapat digunakan untuk proses defuzzifikasi, namun yang sering digunakan adalah Metode *Center of Area (COA)*,

$$u = \frac{\sum_{i=1}^m C_i \mu_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i} \quad (3-42)$$

dengan,

m : tingkat kuantisasi

C_i : titik tengah elemen ke- i

μ_i : derajat keanggotaan elemen ke- i

u : harga sinyal kontrol

Artificial Immune System via Clonal Selection

Optimisasi merupakan proses pencarian untuk menemukan satu atau lebih solusi yang layak terhadap satu atau lebih objektif di dalam permasalahan tertentu. Akhir-akhir ini, banyak ilmuwan yang tertarik memecahkan masalah optimisasi menggunakan sistem yang terinspirasi dari sistem biologis. Para ahli komputer, insinyur, ahli matematika, ahli filsafat dan peneliti-peneliti lain sangat tertarik pada kemampuan sistem ini, antara lain *Artificial Neural Networks (ANN)*, *evolutionary computation*, *DNA computation* dan *Artificial Immune Systems (AIS)*. Sistem *immune* (sistem kekebalan tubuh) merupakan sebuah sel, molekul dan organ tubuh kompleks dengan kemampuan melakukan beberapa tugas pengenalan pola, pembelajaran, *memory acquisition*, generalisasi,

pendistribusian deteksi dan optimisasi. Prinsip dasar sistem *immune* dikembangkan menjadi teknik komputasi baru untuk menyelesaikan berbagai permasalahan, yakni sebuah teknik yang terinspirasi secara biologis atau disebut dengan *Artificial Immune System (AIS)*.

Banyak sifat dari sistem *immune* yang dapat menarik perhatian para ahli komputer dan insinyur, antara lain sebagai berikut.

1. Keunikan, di mana tiap-tiap individu mempunyai Sistem kekebalan (*immune*) masing-masing dengan sifat dan kemampuan khusus dalam mengenali penyakit.
2. Pengenalan benda asing, di mana molekul-molekul asing yang masuk ke dalam tubuh dapat dikenali dan dieliminasi oleh sistem *immune*.
3. Pendeteksian kelainan, di mana sistem *immune* dapat mendeteksi dan merespons patogen, walaupun belum pernah ada dalam tubuh.
4. Pendeteksian yang terdistribusi, di mana sel-sel sistem *immune* terdistribusi ke seluruh tubuh dan tidak terfokus pada daerah pusat kontrol.
5. Pendeteksian yang tidak sempurna, di mana pengenalan mutlak terhadap patogen tidak diperlukan, sehingga sistem lebih fleksibel.
6. Penguatan pembelajaran dan mengingat, di mana sistem dapat mempelajari struktur dari patogen, sehingga untuk respons patogen yang sama pada infeksi kedua atau lebih, menjadi lebih cepat dan lebih efektif.

Sistem Kekebalan (*Immune System*)

Sistem *immune* (sistem kekebalan tubuh) merupakan suatu sistem kompleks yang terdiri atas sel-sel, molekul-molekul dan organ-organ yang mendeskripsikan kemampuan mengidentifikasi, merasakan dan menyerang ketidakfungsian dari sel tubuh dan beraksi terhadap infeksi *exogenous mikroorganisme (infectious nonself)*. Interaksi antara sistem *immune* dengan beberapa sistem dan organ lain dapat menjamin fungsional dan pengaturan tubuh yang stabil [10,11].

Tanpa sistem kekebalan (*immune*), infeksi oleh antigen tidak dapat dihindari. Sel-sel dan molekul-molekul tubuh dijaga agar terbebas dari infeksi organisme. Sistem kekebalan (*immune*) mampu mengenali bermacam-macam infeksi sel-sel dan unsur asing (*nonself*), serta dapat membedakan antara *nonself* dengan sel-sel tubuh asli (*self*) [11,12,13]. Ketika patogen (*nonself*) masuk ke dalam tubuh, sistem kekebalan (*immune*) tubuh akan mendeteksi dan mengeliminasi patogen. Sistem ini memiliki kemampuan untuk mengingat tiap-tiap patogen, sehingga kemunculan kembali patogen yang sama dapat dideteksi dan dieliminasi dengan lebih cepat dan efektif.

Terdapat dua bagian sistem kekebalan (*immune*) yang mampu mengidentifikasi benda asing di dalam tubuh, yaitu *innate immune system* (IIS) dan *adaptive immune system* [14,15]. *Innate immune system* (IIS) merupakan sistem kekebalan (*immune*) yang sudah ada sejak manusia lahir yang memiliki kemampuan untuk mengenal dan menghancurkan jenis patogen atau mikroba tertentu. IIS mampu menghancurkan banyak patogen yang pertama kali masuk ke dalam tubuh manusia. Komponen penting dari respons IIS ialah protein darah atau disebut dengan komplemen, yang dapat membantu aktivitas dari antibodi. *Innate immunity* merupakan dasar dari reseptor yang dikenal sebagai *pattern recognition receptors* (PRRs). Fungsinya ialah mengenal pola molekul-molekul patogen yang disebut *patogen associated molecularr patterns* (PAMPs). PAMPs hanya diproduksi mikroba dan tidak pernah diproduksi oleh sekumpulan organisme sehingga dapat dikenali oleh PRRs. PRRs mampu menghasilkan sinyal yang menandakan keberadaan patogen. Mekanisme ini menunjukkan bahwa *innate immunity* mampu membedakan antara *self* dan *nonself* yang berperan penting dalam meningkatkan kinerja Sistem kekebalan (*immune*).

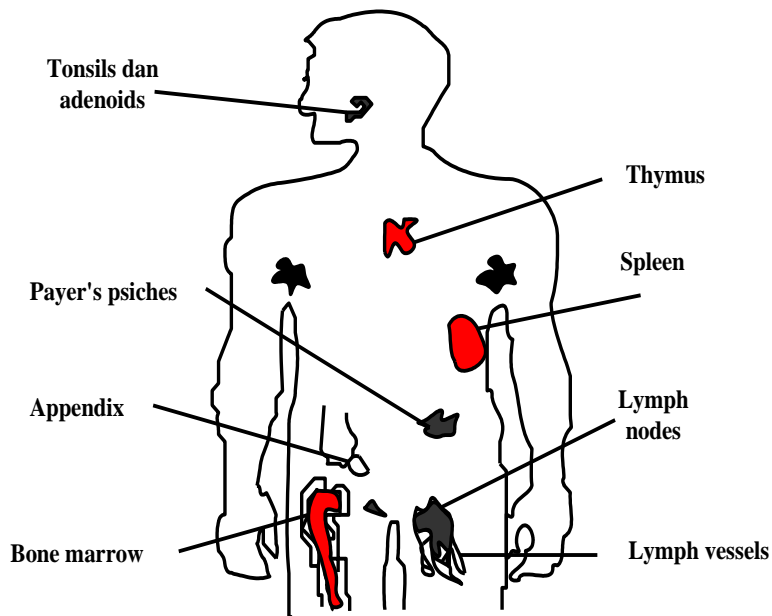
Hal terpenting dari *innate immune recognition* (IIR) ialah untuk mengenali sinyal-sinyal antigen *presenting cells* (APCs) yang akan mengatur aktivitas *T-lymphocytes* dan meningkatkan tahap awal dari *adaptive immune respons*. Dengan cara ini, *adaptive immune recognition* tanpa IIR dapat menghasilkan proses *negative selection* dari *lymphocytes*

sehingga mampu mempercepat *receptor-receptor* yang terlibat dalam pengenalan *adaptive*.

Adaptive immune system secara somatik menghasilkan reseptor antigen yang terdistribusi ke dalam dua tipe *lymphocytes*, yakni sel B dan sel T. Reseptor antigen ini dibangkitkan secara random, yang umumnya desain respons *adaptive immune* didasarkan pada *Clonal Selection* pada *lymphocytes* sebagai reseptor antigen dengan spesifikasi tertentu [16,17]. Molekul-molekul antibodi (Ab) berperan penting dalam *adaptive immune system*. Reseptor-reseptor yang digunakan dalam respons *adaptive immune system* terbentuk dari gabungan segmen-segmen gen. Masing-masing sel membentuk reseptor yang unik. Gabungan bagian-bagian reseptor ini dapat mengenali *nonself*. Sistem kekebalan (*immune*) adaptif inilah yang memungkinkan tubuh mampu mengenal dan merespons setiap mikroba di dalam tubuh meskipun tidak dikenali sebelumnya.

Anatomi Sistem *Immune*

Jaring-jaring dan bagian tubuh penyusun sistem *immune* terdistribusi di seluruh tubuh dikenal dengan *lymphoid*. *Lymphoid* memproduksi, menumbuhkan dan mengembangkan *lymphocytes*, *leukocytes* yang merupakan komposisi utama sistem kekebalan (*immune*) tubuh. Dalam *lymphoid*, *lymphocytes* saling berhubungan dengan sel *nonlymphoid* penting yang lain selama proses maturasi atau selama permulaan respons *immune*. Organ *lymphoid* terdiri atas *primary* (sentral) yang memproduksi *lymphocytes* baru dan *secondary* (*peripheral*) sebagai tempat *lymphocyte repertoires* bertemu dengan antigen.



Gambar 2.28 Anatomi Sistem Kekebalan (*Immune*)

Dari gambar di atas kita bisa melihat ilustrasi organ *lymphoid* yang memiliki fungsi-fungsi sebagai berikut. [18,19,20],

1. *Tonsils* dan *adenoids*, yakni *node-node lymph* khusus yang mengandung sel-sel kekebalan untuk melindungi tubuh dari serangan penyakit terkait sistem pernapasan.
2. *Lymphatic vessels*, merupakan suatu jaring dari saluran yang mengangkut *lymp* (cairan pembawa sel-sel *lymphatic* dan *exogenous* antigens) ke organ-organ sistem kekebalan (*immune*) dan darah.
3. *Bone marrow*, yakni jaringan lembut di dalam bagian tulang-tulang panjang yang bertanggungjawab terhadap generasi sel-sel kekebalan.
4. *Lymph nodes*, merupakan lokasi pemusatan *Lymphatic vessels* yang tiap-tiap titiknya menyimpan sel-sel kekebalan, termasuk sel-sel B dan sel-sel T (lokasi respons kekebalan adaptif mengambil tempat).

5. *Thymus*, di mana beberapa sel berpindah tempat dari sumsum tulang ke dalam *thymus*, lalu melakukan penggandaan (*cloning*) dan maturasi, mentransformasikan dirinya sendiri ke dalam sel-sel T, serta memproduksi suatu respons kekebalan.
6. *Spleen*, merupakan tempat *leukocytes* menghancurkan organisme-organisme yang masuk ke dalam aliran darah.
7. *Appendix* dan *Peyer's patches*, merupakan node-node *lymph* khusus yang mengandung sel-sel kekebalan yang bertugas untuk melindungi sistem pencernaan.

Sistem *immune* tersusun atas *layer-layer* sebagai pertahanan yang tersebar dan berlevel-level. *Layer-layer* pelindung dalam sistem *immune* digolongkan sebagai berikut.

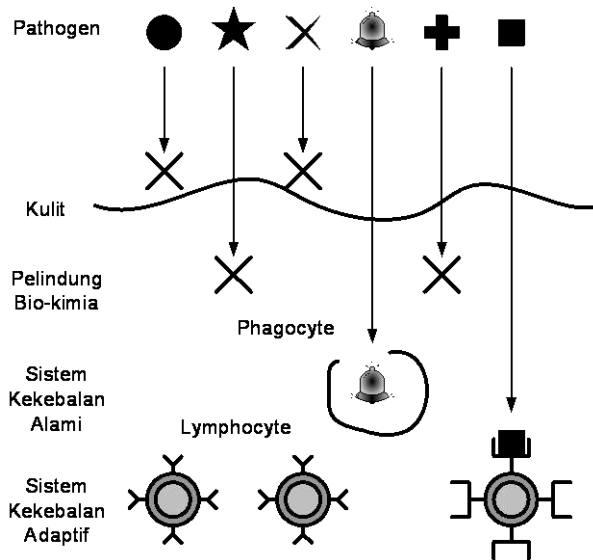
1. *Physical barriers*

Kulit bekerja sebagai perisai perlindungan tubuh terhadap sel-sel asing yang berbahaya atau tidak berbahaya. Sistem pernapasan juga membantu menjaga tubuh dari antigen. Pertahanan di dalamnya meliputi penjerat pengganggu pada *nasal hairs* dan *mucus* (getah, lendir), membawa *mucus* naik dan turun melalui *cilia*, dengan batuk dan bersin. Kulit dan membran-membran selaput lendir pada lapisan sistem pencernaan dan pernapasan juga mengandung *macrophages* dan antibodi-antibodi.

2. *Physiologic barriers*

Ia mengalir seperti air liur, keringat dan air mata berisi enzim yang sifatnya ialah merusak. *Stomach acids* (asam perut) membunuh mikroorganisme-mikroorganisme yang tertelan bersama makanan dan air. Ph dan temperatur tubuh menghasilkan kondisi-kondisi kurang baik terhadap beberapa sel asing.

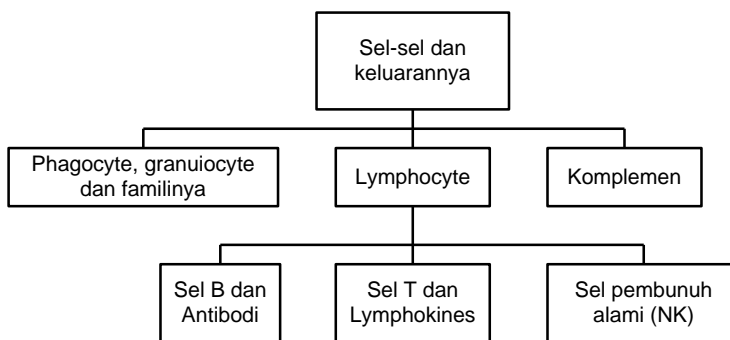
3. Sistem kekebalan (*immune*) alami dan sistem kekebalan (*immune*) adaptif.



Gambar 2.29 Struktur *Multilayer* Sistem Kekebalan (*Immune*)

Sel-Sel *Immune* (*Immune Cells*)

Sistem kekebalan (*immune*) terdiri atas variasi sel yang besar dan dihasilkan oleh *bone marrow* (sumsum tulang). Sebagian besar dari mereka melakukan pematangan. Dari *bone marrow*, sel-sel kekebalan berpindah jaring-jaring patroli dan bersirkulasi di dalam darah dan *lymphatic vessel*.



Gambar 2.30 Divisi Struktural Sel-Sel Sistem Kekebalan (*Immune*)

Beberapa sel *immune* bertanggung jawab untuk sistem pertahanan tubuh secara umum, sementara lainnya berlatih untuk menyerang patogen yang sangat kuat. Untuk berfungsi secara efisien, sel-sel *immune* saling bekerja sama secara terus menerus. Gambar di atas mempresentasikan divisi-divisi sel-sel dan *output* yang diproduksi oleh sistem kekebalan (*immune*).

Lymphocytes

Lymphocytes adalah *leukocytes* kecil yang berperan penting di dalam sistem *immune*. Ada dua tipe *lymphocytes*, yaitu **B lymphocytes** (sel **B**) yang mengaktifkan, mengadakan pembedaan kemampuan *plasmocytes* (sel plasma) dari produksi *antibody*; serta **T lymphocyte** (sel **T**).

Sebagian besar *Lymphocytes* dibentuk oleh sisa-sisa sel kecil dengan aktivitas fungsionalnya setelah berinteraksi dengan antigen. *B* dan *T lymphocytes* merupakan reseptor-reseptor spesifik dalam mengenali jenis antigen. Reseptor sel B merupakan salah satu bentuk molekul antibodi yang diproduksi setelah sel diaktifkan. Berikut merupakan bagian-bagian *lymphocytes*.

a. Sel-sel B dan Antibodi

Fungsi utama sel B adalah memproduksi dan mengeluarkan antibodi-antibodi (**Ab**) sebagai respons atas protein-protein *exogenous* seperti bakteri, virus dan sel-sel tumor. Masing-masing sel B dirancang untuk memproduksi sebuah antibodi yang spesifik. Antibodi merupakan spesifik protein yang mampu mengenali dan mengikat partikel-partikel protein yang lain. Produksi dan ikatan antara antibodi-antibodi umumnya merupakan cara pemberian sinyal untuk membunuh, mencerna dan menghilangkan zat-zat yang dipilih.

b. Sel-sel T dan *Lymphokines*

Disebut sel T karena mereka matang dalam *thymus*, yang fungsinya ialah untuk mengatur aktifitas sel-sel yang lain, dan menyerang secara langsung sel-sel tubuh yang terinfeksi. *T lymphocytes* dapat dibagi dalam tiga kelas yakni *T helper cell* (Th), *cytotoxic*

(pembunuh) *T cell* dan *suppressor* (penindas) *T cell*. *T helper cells* atau *Th cells* merupakan sel-sel penting untuk mengaktifkan sel-sel B, sel-sel T yang lain, *macrophages* dan *natural killer* (NK) *cells*. *Killer T cells* atau *cytotoxic T cells* mampu mengeliminasi mikroba, virus atau sel kanker. *Suppressor T lymphocytes* merupakan peralatan vital untuk memelihara respons dari *immune system*. Tanpanya, kekebalan dapat dipastikan kehilangan kontrol dalam mengendalikan reaksi alergi dan kekebalan yang bekerja secara otomatis terhadap penyakit [16]. Pekerjaan utama sel-sel T ialah mengeluarkan substansi-substansi yakni *cytokines* atau khususnya *lymphokines* dan keluarga mereka monokines yang dihasilkan oleh *monocytes* dan *macrophages*. Substansi-substansi ini secara penuh merupakan pesan-pesan kimia. *Lymphokines* menaikan perkembangan struktur sel-sel, aktivitas dan pengaturan. *Lymphokines* juga membunuh sel-sel yang ditarget dan merangsang *macrophages*.

c. *Natural Killer Cells* (Sel-Sel Pembunuh Alami)

Natural killer cells (NK) merupakan jenis *lymphocytes* mematikan lainnya. Seperti *Killer T cell*, mereka mengandung butir-butir halus yang terisi penuh dengan zat-zat kimia. Mereka didesain sebagai pembunuh alami sebab tidak seperti *killer T cells*, yang tidak perlu mengenali spesifik antigen sebelum mulai beraksi. Mereka menyerang tumor dan melindungi dari variasi-variasi besar dari infeksi mikroba. Sel-sel ini juga berkontribusi untuk regulasi kekebalan, dan pengeluaran *lymphokines* dalam jumlah besar.

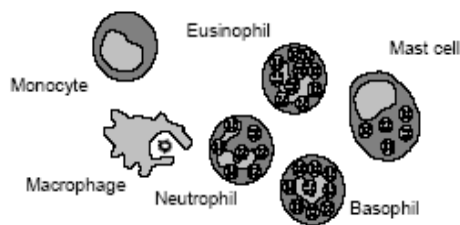
Phagocytes, Granulocytes dan Familinya

Phagocytes merupakan sel-sel darah putih yang mampu mencerna mikroorganisme dan partikel-partikel antigen. Beberapa *phagocytes* juga dapat mengubah antigen-antigen ke dalam *lymphocytes*, yang dikenal sebagai antigen *presenting cells* (APCs).

Monocytes dan *magrophages* merupakan bagian terpenting di dalam *phagocytes*. *Monocytes* bersirkulasi dalam darah dan berpindah ke

dalam jaring otot. Dalam jaring otot, *monocytes* berubah menjadi *macrophages* ("big eaters"). *Macrophages* merupakan sel-sel serbaguna yang mampu melakukan beberapa fungsi. *Macrophages* mengubah antigen menjadi *T lymphocytes*, setelah mencernakan antigen tersebut. *Monocytes* dan *macrophages* berperan penting di dalam tahap permulaan respons sistem *immune*.

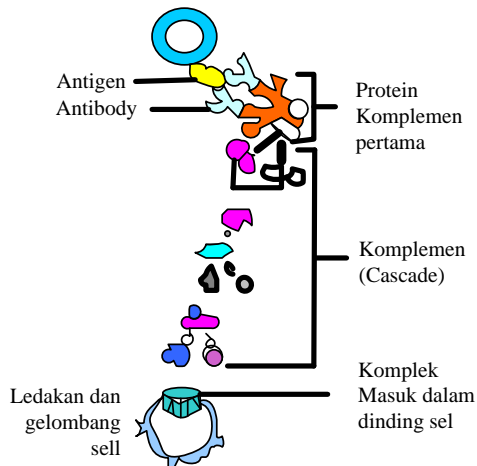
Neutrophils dan *eusinophils* juga merupakan *phagocytes* dengan fungsi yang sama seperti *macrophages*. *Basophils* ditemukan di dalam aliran darah dan sama dengan *mast cells*, meskipun mereka memiliki asal yang berbeda. *Basophils* penting untuk respons *allergic*. Ia juga mengandung butir-butir halus yang berisi bahan kimia yang berfungsi untuk menghancurkan mikroorganisme, serta memberikan kontribusi dalam reaksi penyebab radang. Gambar di bawah ini mengilustrasikan bagian-bagian *phagocytes* yang sangat penting.



Gambar 2.31 Phagocytic Cells

Sistem Komplemen (*Complement*)

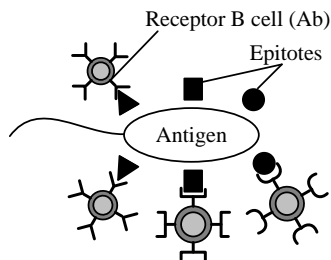
Sistem komplemen merupakan sirkulasi protein plasma yang kompleks dengan fungsinya yakni melengkapi fungsi dari antibodi. Ketika komplemen mendeteksi adanya patogen, masing-masing komponen di dalamnya membentuk reaksi berantai (*complement cascade*). Reaksi ini membentuk protein kompleks yang mengikat permukaan antigen penyebab luka pada selaput pelindung dari antigen atau memudahkan operasi *phagocytes*. Protein kompleks dibentuk oleh kira-kira 25 protein yang beredar secara tidak aktif di seluruh tubuh. Gambar berikut menunjukkan proses reaksi berantai dalam sistem komplemen.



Gambar 2.32 Proses Reaksi Berantai dalam Sistem Komplemen

Pengenalan Antigen

Poin utama dari pola pengenalan antigen dalam sistem kekebalan (*immune*) yaitu sel-sel B dan sel-sel T yang memiliki molekul-molekul *receptor* pada permukaan kulitnya. Fungsinya ialah untuk mengenali antigen (bebas atau yang terikat molekul MHC). Pada kasus sel B, *receptor*-nya merupakan *immunoglobulin* atau antibodi, molekul tertancap di membran sel.



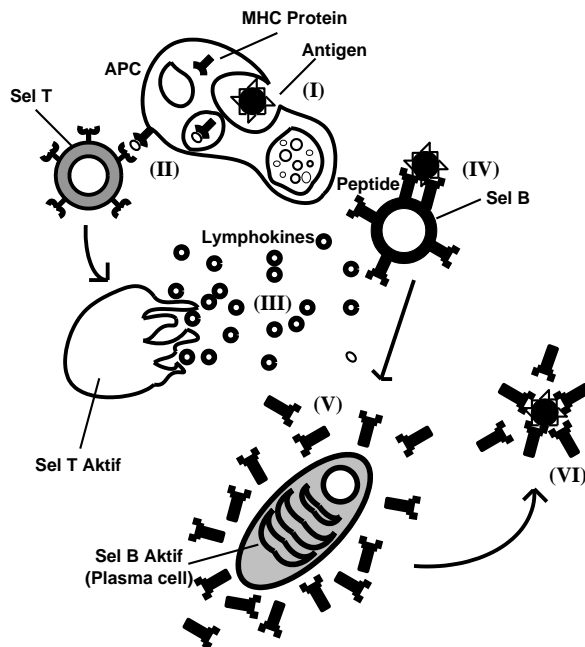
Gambar 2.33 Antigen yang Dikenali oleh Antibodi

Pada sel T, *receptor*-nya disebut TCR (*T Cell Receptor*). Pengenalan di sistem kekebalan (*immune*) terjadi pada level molekul dan didasarkan

pada bentuk hubungan antara bagian *receptor* yang terikat dan bagian dari antigen yang disebut *epitope*. Pada saat antibodi-antibodi dianggap suatu *receptor* tunggal, antigen memiliki *epitope* yang banyak, sehingga satu antigen dapat dikenali berbagai macam molekul-molekul antigen seperti gambar di atas. Kekuatan ikatan antara *receptor* pada antibodi dan *epitope* pada antigen disebut *affinity*.

Metode Sistem *Immune* dalam Melindungi Tubuh

Tubuh manusia dilindungi oleh semacam angkatan perang yang terdiri dari molekul-molekul dan sel-sel berbeda yang saling bekerja sama. Target utama dari seluruh respons kekebalan ialah antigen (**Ag**) sebagai molekul-molekul asing yang berasal dari bakteri dan virus.



Gambar 2.34 Cara Sistem Kekebalan (*Immune*) Melindungi Tubuh

Antigen Presenting Cells (APCs) seperti *macrophages*, menjelajahi tubuh lalu mencerna antigen yang mereka temukan, kemudian

memotong-memotongnya di dalam *antigenic peptides* [21] (I). Potongan-potongan dari *peptides* digabungkan ke dalam molekul *major histocompatibility complex* (MHC) lalu dimunculkan ke permukaan sel. Sel-sel darah putih lainnya yang disebut sel-sel T atau *T lymphocytes* memiliki molekul-molekul reseptor yang memungkinkan mereka mampu mengenali kombinasi *peptide*-MHC yang berbeda (II).

Sel-sel T diaktifkan oleh pengenalan yang membagi dan mengeluarkan *lymphokines* atau sinyal-sinyal kimia sebagai penggerak komponen-komponen lain pada sistem kekebalan (*immune*) (III). *B lymphocytes* juga memiliki molekul-molekul reseptor khusus pada permukaannya untuk merespons sinyal tersebut. Tidak seperti reseptor sel-sel T, reseptor sel-sel B mampu mengenali bagian-bagian dari antigen yang tidak dikenali, tanpa molekul MHC (IV). Pada saat diaktifkan, sel-sel B dibagi dan dibedakan ke dalam *plasma cells* yang mengeluarkan protein antibodi berupa larutan pada *receptor-receptor* (V). Melalui pengikatan dengan antigen yang ditemukan, antibodi mampu menetralkan (VI) atau mempercepat proses pemusnahan antigen dengan *complement enzymes* atau *scavenging cells*. Beberapa sel T dan sel B menjadi sel-sel memori yang tetap bersirkulasi dan meningkatkan kecepatan sistem kekebalan (*immune*) untuk mengeliminasi antigen yang sama apabila kembali ditemukan. Mengingat antibodi dalam sel-sel B sering melakukan mutasi dan perbaikan, antibodi pun mengalami peningkatan respons setelah terulangnya proses kekebalan. Fenomena ini disebut dengan *affinity maturation* (pematangan nilai *affinity*).

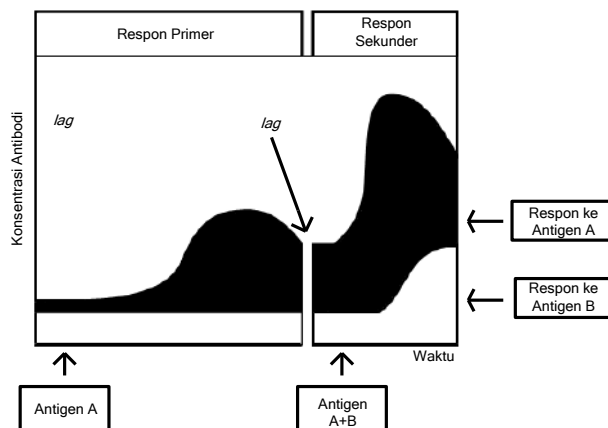
Kemampuan Pembelajaran Sistem *Immune*

Pembelajaran dalam sistem kekebalan (*immune*) mencakup peningkatan ukuran populasi dan *affinity* dari *lymphocyte-lymphocyte* yang terbukti mampu mengenali antigen tertentu. Melalui penggunaan teori *Clonal Selection* untuk memperoleh solusi suatu masalah, kita tidak perlu menjaga populasi yang besar untuk kandidat-kandidat solusi, tetapi hanya perlu menjaga kumpulan kecil individu-individu yang berkualitas. Klon yang bersifat sementara akan diciptakan dan *clone-clone* dengan

affinity rendah akan dihapus. Hal ini bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan menggunakan jumlah yang kecil dari sumber-sumber yang ada sehingga solusi-solusi dengan kualitas tinggi dapat diperoleh.

Pada evolusi normal sistem kekebalan (*immune*), suatu antibodi diharapkan mampu menghadapi antigen yang menyerang secara berulang-ulang selama hidupnya. Respons awal terhadap antibodi yang merangsang sistem kekebalan (*immune*) adaptif dipegang oleh spektrum dari klon-klon sel B dengan *affinity* rendah. Masing-masing sel B menghasilkan antibodi-antibodi dengan *affinity* yang bervariasi. Efektivitas respons kekebalan pada respons kedua ditingkatkan oleh kehadiran sel memori yang berkaitan dengan infeksi pada respons pertama sehingga antibodi dengan *affinity* yang lebih tinggi di respons berikutnya mampu diproduksi. Strategi seperti ini memastikan bahwa kecepatan dan ketelitian respons kekebalan menjadi lebih besar setiap terjadi infeksi [24]. Ini merupakan suatu skema dasar dari strategi “*reinforcement learning*” [25], sehingga sistem secara terus-menerus meningkatkan kemampuan dalam melaksanakan tugasnya.

Untuk menggambarkan mekanisme pembelajaran dari kekebalan adaptif, suatu antigen Ag_1 ditemukan saat kondisi awal dan dikenali oleh beberapa antibodi seperti gambar berikut.



Gambar 2.35 Respons Kekebalan *Cross-reactive*

Setelah *phase lag*, antibodi yang melawan antigen **Ag₁** muncul dan kemampuan antibodi ini meningkat hingga level tertentu dan mulai terjadi penolakan. Ketika antigen **Ag₂** muncul, tidak ada antibodi yang mengenalinya dan memperlihatkan tanggapan khusus dari antibodi. Artinya, satu karakteristik yang penting dari memori kekebalan yaitu bekerja secara serentak. Sel-sel B pada respons sekunder dapat mengantisipasi antigen **Ag₁** lebih cepat dan efisien. Respons ini tidak hanya terhadap antigen **Ag₁**, tetapi juga terhadap antigen **Ag₁+Ag₂**. Fenomena ini disebut dengan *immunological cross-reaction*, atau respons *cross-reactive*.

Ada dua karakteristik menarik yang terlibat dari memori dalam konteks Sistem kekebalan (*immune*). Pertama, pola yang tersimpan diperoleh melalui keberadaan pola yang tidak utuh atau rusak. Kedua, ia tahan terhadap *noise* pada data dan kesalahan dalam komponen memori.

Melalui perbandingan dengan respons awal (*primary respons*), respons kedua (*secondary respons*) memiliki *phase lag* yang singkat, kecepatan yang tinggi, dan juga antibodi sintetik yang tahan lama. Bahkan suatu antigen dengan dosis yang lebih rendah digunakan untuk melakukan respons awal agar menyebabkan respons sekunder.

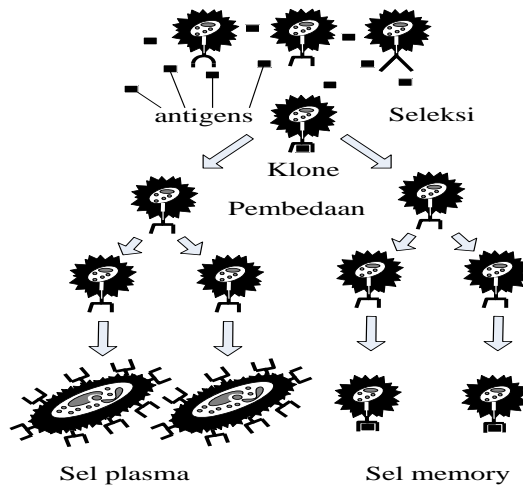
Sel-sel dengan *affinity* tinggi harus menjadi kandidat atas solusi permasalahan yang berkualitas, dan hanya akan diganti oleh sel-sel yang lebih bagus. Singkatnya, pembelajaran kekebalan dan memori kekebalan dapat diperoleh dengan cara:

- a. Mengekspos ulang suatu patogen
- b. *Affinity maturation* pada molekul-molekul *receptor*
- c. Infeksi kronis level rendah
- d. *Cross-reactivity* terhadap *endogin* dan *exogenous patogen*

Gambaran Umum Clonal Selection

Clonal Selection merupakan algoritma yang digunakan sistem kekebalan (*immune*) untuk menerangkan sifat dasar respons kekebalan terhadap serangan antigen. Hanya antibodi yang mengenali antigen yang

mampu berkembang biak. *Clonal Selection* beroperasi pada sel-sel T dan sel-sel B.



Gambar 2.36 Prinsip *Clonal Selection*

Respons *immune* terjadi dalam *lymph nodes* [22] dan perluasan secara clonal *lymphocytes* terjadi di dalam *germinal center* (GCs), daerah tertentu pada *white pulp* yang kaya dengan APCs [22]. Pada saat antibodi mengenali antigen, beberapa *subpopulation* dari *bone marrow* memperoleh sel-sel respons (*B lymphocytes*) yang direspons menggunakan produksi antibodi. Masing-masing sel mengeluarkan satu macam antibodi dengan spesifikasi sesuai dengan antigen.

Melalui pengikatan antigen ke *receptor-receptor immunoglobulin*, dengan sinyal kedua dari sel tambahan seperti *T-helper cell*, antigen merangsang sel B untuk berkembang biak dan matang ke dalam terminal sel-sel penghasil antibodi atau dikenal dengan *plasma cells*. *Plasma cells* merupakan zat-zat antibodi yang aktif. *B lymphocytes* berukuran besar juga menghasilkan antibodi (**Ab**) meskipun lemah. Selama sel-sel B menghasilkan **Ab**, sel-sel T tidak menghasilkan antibodi namun memiliki peran penting dalam pengaturan respons sel B dan sel yang bertindak sebagai respons kekebalan. Perkembangbiakan *lymphocytes* pada *plasma*

cells dapat dibedakan di dalam sel-sel memori B. Sel-sel memori bersirkulasi melalui darah, *lymph* dan jaringan, yang mungkin tidak menghasilkan antibodi. Pada saat terjadi serangan antigen kedua, sel-sel memori mulai memilih *lymphocytes* yang mampu memproduksi antibodi dengan *affinity* tinggi, kemudian dipilih antigen spesifik yang merangsang respons utama.

Sifat-sifat utama teori *Clonal Selection* [16] antara lain:

1. Sel-sel baru sebagai hasil *cloning* dari orang tua mereka dipilih untuk mekanisme mutasi tingkat tinggi secara somatik (*somatic hypermutation*).
2. Penghapusan *lymphocytes* yang memiliki *affinity* rendah.
3. Pengembangbiakan dan pembedaan pada sel-sel matang yang sesuai dengan antigen.

Analogi seleksi alami merupakan klon yang paling sesuai dan baik dalam mengenali antigen. Agar algoritma ini berjalan, populasi *receptor* atau *repertoire* harus berbagai macam jenis sehingga *repertoire* dapat mengenali berbagai macam bentuk antigen.

Somatic Hypermutation, Receptor Editing dan Repertoire Diversity

Pada respons kekebalan sel T, *repertoire* dari antigen-activated sel B memiliki dua mekanisme dasar, yaitu *hypermutation* dan *receptor editing*. Hanya sel-sel dengan *affinity* tinggi yang dapat masuk ke dalam sel-sel memori. Proses pematangan ini berlangsung di dalam *Germinal Center* (GC).

Antibodi pada respons memori rata-rata memiliki *affinity* lebih tinggi dibandingkan antibodi pada respons awal. Fenomena ini, untuk respons-respons sel T, sering disebut pematangan respons kekebalan. Proses pematangan ini membutuhkan antigen-*binding* pada molekul-molekul antibodi dalam respons yang matang, sehingga secara struktur berbeda dari antibodi pada respons awal.

Perubahan secara acak di dalam gen-gen yang bertanggungjawab terhadap interaksi-interaksi **Ag-Ab**, bahkan terkadang satu perubahan saja dapat meningkatkan nilai *affinity* suatu antibodi. Variasi terhadap

affinity tinggi diseleksi untuk masuk ke dalam sel-sel memori. Tidak hanya *repertoire* yang diacak melalui mekanisme *hypermutsasi* tertentu, mekanisme agar sel-sel B dengan *affinity* tinggi juga dapat dipilih untuk mendominasi respons. Sel-sel dengan *affinity* rendah atau reseptor-reseptor *self-reactive* harus dihapus atau diubah.

Dalam hal ini kita berhasil memperoleh informasi, bahwa sistem kekebalan menerapkan seleksi molekular untuk reseptor-reseptor sebagai tambahan *Clonal Selection* pada *lympocytes*. Alih-alih yang diharapkan pada penghapusan sel-sel *self-reactive*, terkadang *B lymphocytes* yang ditemukan sudah mengalami perbaikan reseptor. Sel-sel B telah menghapus reseptor dengan *affinity* rendah dan membuat reseptor baru melalui proses kombinasi ulang.

Sistem Evolusi

Fungsi *Clonal Selection* pada sistem *immune* menjadi bagian yang terdapat dalam hukum evolusi Charles Darwin. Ada tiga prinsip utama yang berkaitan dalam hal ini, yaitu keanekaragaman sel (*repertoire diversity*), variasi genetik (*genetic variation*), dan seleksi alam (*natural selection*) [26]. *Repertoire diversity* memiliki fungsi sistem kekebalan yakni memproduksi banyak antibodi untuk mengikat antigen. Pada kenyataannya, sebagian besar antibodi yang dihasilkan tidak berperan aktif pada sistem kekebalan. *Natural selection* diberikan oleh daerah-daerah variabel gen yang bertanggung jawab dalam memproduksi bermacam-macam populasi antibodi.

Immune Engineering

Di bagian ini kita akan mengenal konsep *immune engineering*, serta penjelasan singkat tentang hubungan *immune engineering* dengan *Artificial Immune Systems*. Saat ini, sebagian besar penyelesaian permasalahan teknologi didasarkan pada perencanaan atau aturan terperinci dengan komponen-komponen yang menyertai di alamnya. Permasalahan teknik terdiri dari dasar desain sistem untuk melakukan tugas tertentu, sedangkan pendekatan konvensional secara sistematis menjelaskan prosedur langkah-langkah yang terperinci. Pendekatan ini

tidak mampu memberikan penyelesaian efisien untuk permasalahan teknik yang kompleks, sehingga di sini diperlukan adanya paradigma yang baru.

Kemampuan sistem yang alami jauh lebih baik dibandingkan dengan sistem konvensional. Penjelasan dan aplikasi dari prinsip umum perilaku sistem alami dapat melahirkan bidang teknik yang baru secara holistik. Banyak contoh komponen dasar sistem yang bersaing dan berkerja sama untuk membentuk perilaku sistem yang kompleks, seperti koloni serangga, sistem kekebalan, dan lain-lain. Salah satu karakteristik sistem yang utama ialah kekokohan yang tampak dari toleransi tinggi terhadap gangguan kecil komponen individu.

Ide yang menarik dari sistem alami, seperti *immunology* dan *neurobiology*, ialah bisa digunakan untuk desain sistem dengan perilaku kompleks yang dapat dikontrol dan digunakan untuk melakukan tugas tertentu. Sistem *immune* mampu menyelesaikan tugas pengenalan pola dengan baik, di mana setiap perubahan kecil dari pola (*patogen*) masih dapat direspons.

Teknik konvensional memerlukan spesifikasi yang detail mengenai perilaku masing-masing komponen sistem. Sementara paradigma teknik yang baru (*immune engineering*) hanya memerlukan spesifikasi umum atau beberapa perilaku sistem secara umum, seperti ukuran tingkat performansi atau fungsi *fitness*.

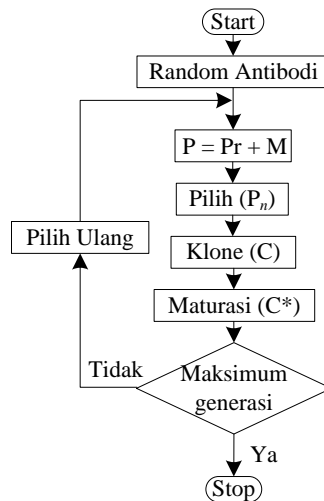
Artificial Immune System (AIS) merepresentasikan mekanisme sistem *immune* dalam meningkatkan kinerja dalam fenomena biologi. Artinya, *immune engineering* (IE) mewakili semua pendekatan yang menggunakan inspirasi kekebalan untuk mengembangkan teknik komputasi. Gagasan ini diaplikasikan menggunakan informasi di dalam suatu masalah, serta digunakan untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Penggunaan algoritma imunologi mampu memecahkan permasalahan yang rumit. Topik yang terlibat dalam definisi dan pengembangan *immune engineering* sebagian besar meliputi:

1. Algoritma dan struktur *hybrid* yang diambil dari mekanisme *immune*.

2. Algoritma komputasi didasarkan pada prinsip imunologi, seperti proses distribusi, algoritma *Clonal Selection*, dan teori *immune network*.
3. *Immune* yang berbasis pada optimisasi, pembelajaran, *self organizing*, *artificial life*, model kognitif, *multiagen system*, desain, penjadwalan, pengenalan pola, *anomaly detection*.
4. *Artificial Immune System* dan aplikasinya.

Implementasi *Clonal Selection Algorithm* (CSA)

Algoritma *Clonal Selection* (*Clonal Selection Algorithm* atau CSA) dapat diaplikasikan di dalam permasalahan optimisasi. CSA digunakan dalam sistem *immune* untuk memberikan gambaran mekanisme dasar respons *immune* terhadap rangsangan antigen. Hal ini mampu melahirkan ide bahwa hanya sel yang terbaik yang bisa digunakan untuk melawan antigen. Sel terbaik mengalami proses maturasi untuk memperbaiki nilai *affinity* terhadap suatu antigen. Algoritma *Clonal Selection* ini diaplikasikan dalam proses komputasi. Sederhananya, algoritma AIS via *Clonal Selection* ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 2.37 Algoritma *Clonal Selection*

Dari diagram di atas, proses Algoritma *Clonal Selection* mencakup beberapa tahapan sebagai berikut.

- a. Membangkitkan himpunan \mathbf{P} sebagai kandidat penyelesaian, yang terdiri dari sel memori \mathbf{M} dan sisa populasi \mathbf{P}_r , ($\mathbf{P}=\mathbf{P}_r+\mathbf{M}$).
- b. Menentukan n individu terbaik \mathbf{P}_n dari total individu \mathbf{P} berdasarkan nilai *affinity*.
- c. Proses klon populasi individu terbaik menjadi \mathbf{C} . Besar kecil proses klon tergantung pada nilai *affinity*.
- d. Proses maturasi pada populasi individu hasil klon menjadi \mathbf{C}^* . Dalam proses maturasi ini, dilakukan proses *hypermutasi* yang tergantung pada *affinity*.
- e. Menentukan \mathbf{C}^* sebagai sel memori dan beberapa individu \mathbf{P} dapat diganti dengan \mathbf{C}^* .
- f. Mengganti d populasi antibodi yang memiliki *affinity* rendah.

Langkah b dan c dianggap sangat penting dalam algoritma ini. Jika pada langkah 2 dipilih n sebanyak N , dengan N adalah jumlah semua kandidat yang mungkin, maka semua anggota populasi memiliki kesempatan untuk menjadi solusi. Hal ini disebut sebagai pencarian yang membabi buta (*greedy search*) dan tidak efektif untuk diaplikasikan.

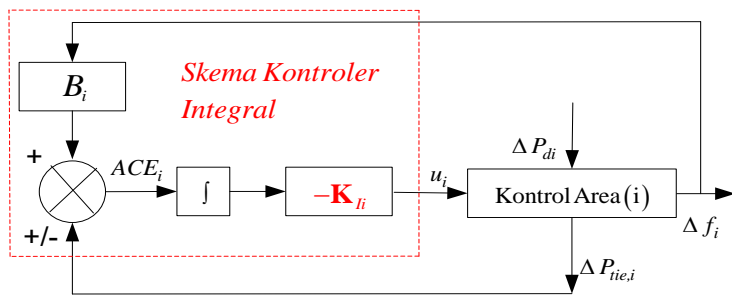
Simulasi dan Analisis Sistem

Dalam hal ini penulis berusaha memaparkan penjelasan tentang penggunaan *Artificial Immune System* (AIS) via *Clonal Selection* untuk mentala matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} kontrol optimal LQR. Juga fungsi keanggotaan input dan *output Fuzzy Logic Controller* secara bersama-sama yang diaplikasikan pada *Load Frequency Control* (LFC) secara terpusat pada interkoneksi sistem tenaga listrik dua area. Penalaan parameter matriks pembobot \mathbf{Q} dan \mathbf{R} kontrol optimal LQR, *Fuzzy Logic Controller* menggunakan *Artificial Immune System* (AIS) via *Clonal Selection* diterapkan untuk memperoleh redaman sistem yang optimum.

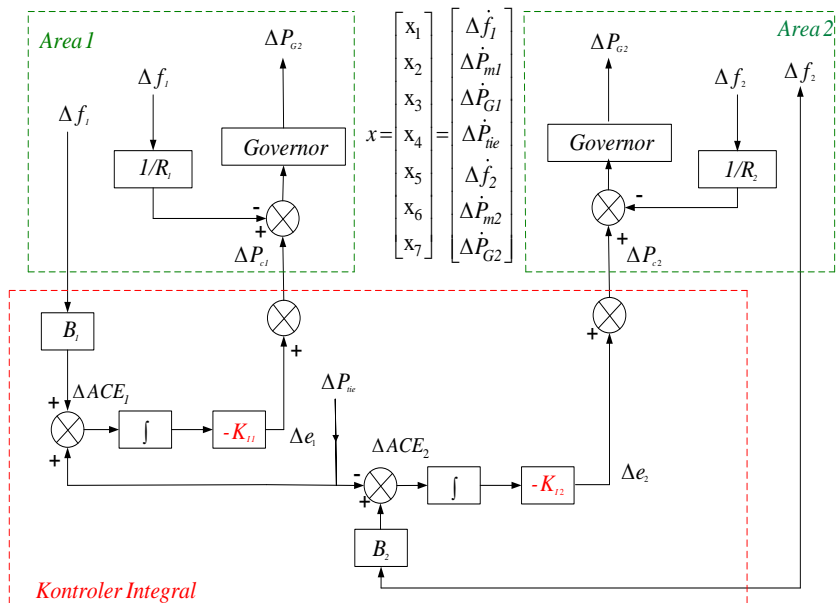
Prosedur pertama yang dilakukan ialah membentuk model *Load Frequency Control* (LFC) sistem tenaga listrik interkoneksi dua area ke dalam bentuk persamaan keadaan (*state-space*). Setelah itu ialah

memasukkan data-data yang diperlukan seperti data turbin, *governor*, dan beban menggunakan referensi [3,27].

Tahap berikutnya ialah membuat *closed-loop system* (sistem lingkaran tertutup) pada sistem *Load Frequency Control* (LFC). *Closed-loop system* (sistem lingkaran tertutup) yang diaplikasikan pada LFC ialah untuk menambahkan penguatan kontroler integral K_i . Penguatan kontroler integral K_i diinputkan ke nilai referensi beban pada unit *governor* (*set point load governor*, ditunjukkan pada dua gambar di bawah ini. Aksi kontrol integral ialah untuk mengatur sinyal *Area Control Error* (ACE) agar frekuensi *steady-state* menuju nol (nilai nominal).



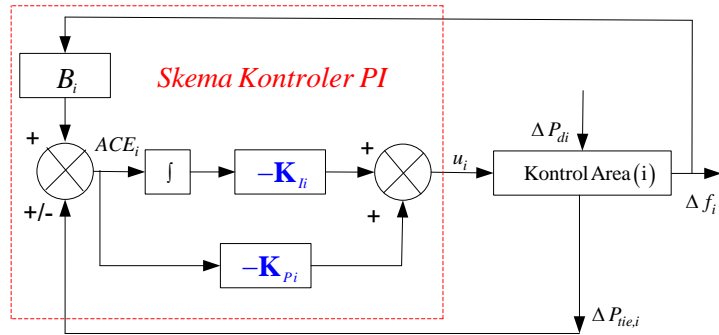
(a) Kontroler Integral dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik area ke $-i$ [3].



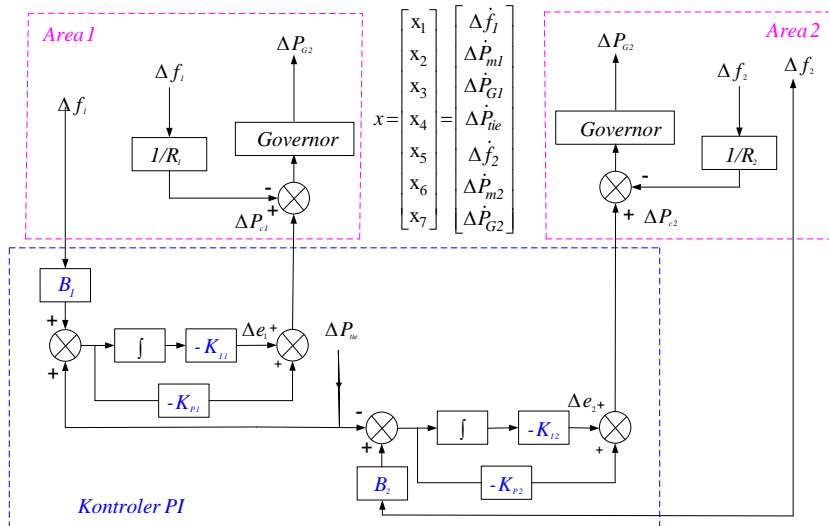
(b) Kontroler Integral dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik dua area [3].

Gambar 2.38 Aplikasi Kontroler Integral pada Sistem LFC Sistem Tenaga Listrik [3].

Tahap selanjutnya ialah menambahkan penguatan kontroler *proportional* K_p sehingga menjadi kontroler *Proportional-Integral* (PI). Kontroler ini terdiri dari penguatan kontroler integral K_i dan penguatan kontroler *proportional* K_p merupakan umpan balik dari sinyal ACE. Kontroler PI digunakan untuk memperbaiki respons dinamik sistem. Kontroler PI diinputkan ke nilai referensi beban pada unit *governor* (*set point load governor*) seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



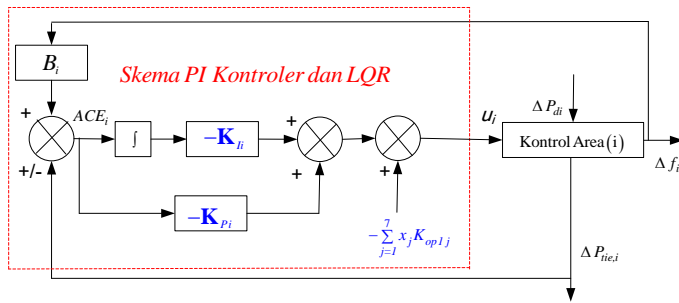
(a) Kontroler PI dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik area ke $-i$.



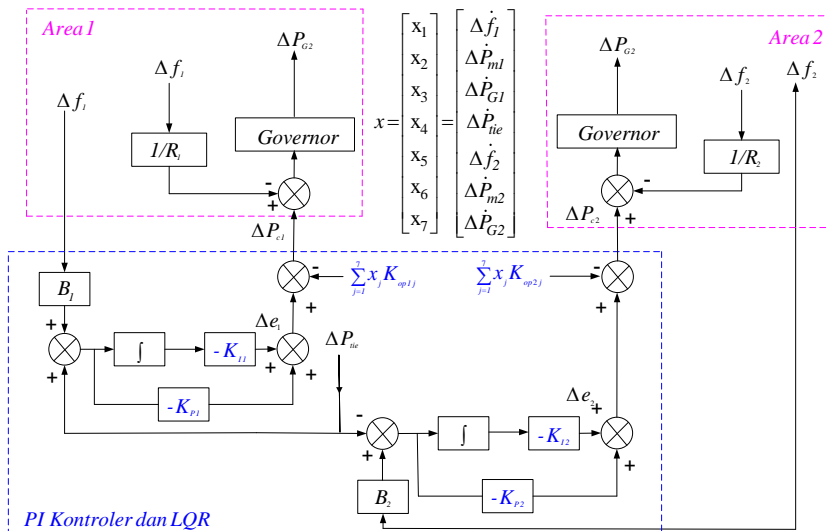
(b) Kontroler PI dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik dua area.

Gambar 2.39 Aplikasi Kontroler PI pada Sistem LFC Sistem Tenaga Listrik

Tahapan berikutnya ialah menambahkan penguatan kontrol optimal K_{op} . Pada tahap ini, penguatan kontroler integral K_i , penguatan *proportional* K_p yang merupakan umpan balik dari sinyal ACE, matriks Q dan R kontrol optimal LQR untuk menghasilkan penguatan K_{op} merupakan umpan balik dari *state*-sistem yang ditala secara *trial-error*.



(a) Kontroler PI dan kontrol optimal LQR dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik area ke $-i$.

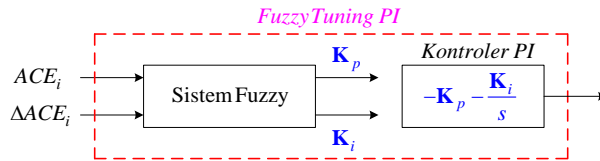


(b) Kontroler PI dan kontrol optimal LQR dipasang pada sistem LFC sistem tenaga listrik dua area

Gambar 2.40 Aplikasi Kontroler PI dan Kontrol Optimal LQR pada Sistem LFC Sistem Tenaga Listrik

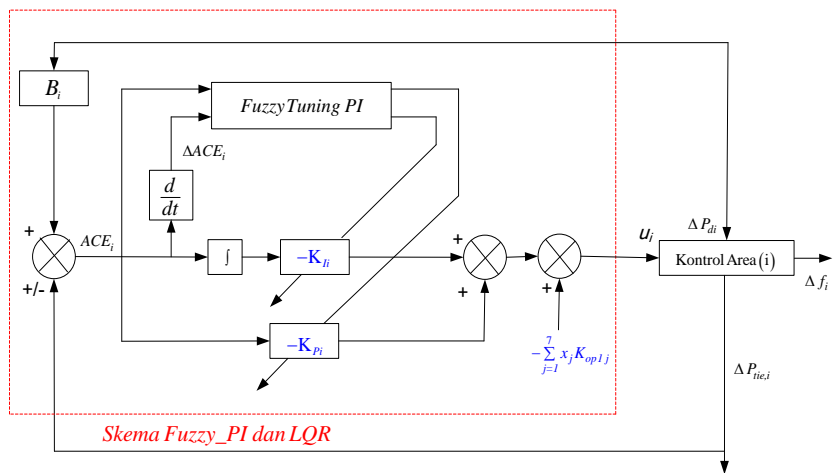
Tahapan berikutnya ialah kontroler PI yang ditala menggunakan *Fuzzy Logic* dengan menentukan parameter-parameter fungsi keanggotaan *Fuzzy Tuning PI* secara *trial-error* dan mentala matriks Q dan R kontrol optimal LQR secara *trial-error* untuk mencari penguatan umpan

balik K_{op} melalui penyelesaian *Algebraic Riccati Equation* (ARE). Dalam hal ini, komponen *sistem fuzzy* menggunakan dua input dan dua *output* yang dimodelkan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.41 Fuzzy Tuning Kontroler PI

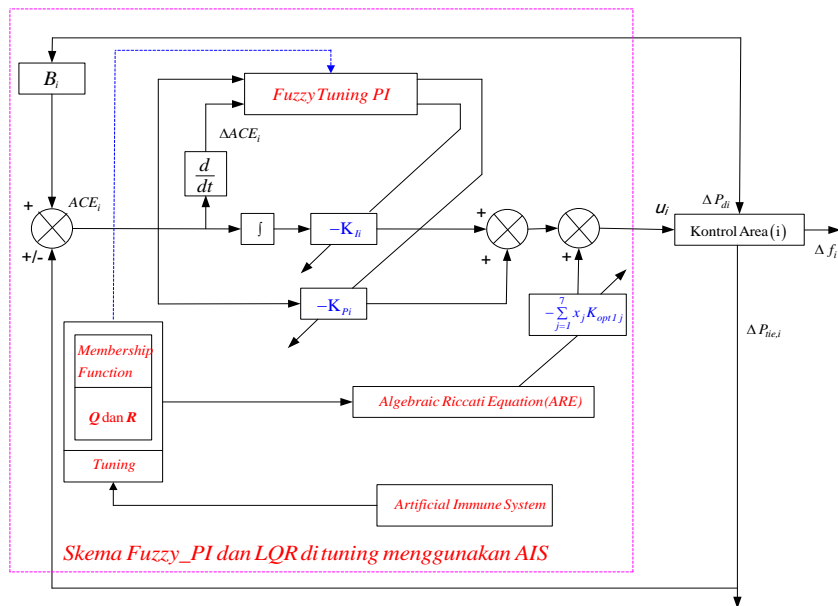
Fuzzy Tuning PI dan kontrol optimal K_{op} diinputkan ke nilai referensi beban pada unit *governor* (*set point load governor*) yang ditunjukkan seperti gambar berikut.



Gambar 2.42 Aplikasi Fuzzy Tuning Kontroler PI dan Kontrol Optimal LQR pada Sistem LFC Sistem Tenaga Listrik

Tahap selanjutnya ialah mentala parameter–parameter matriks Q dan R kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator* (LQR), fungsi

keanggotaan *Fuzzy Logic*. Setelah itu, secara bersamaan diterapkan penggunaan *Artificial Immune System* via *Clonal Selection* untuk mendapatkan hasil/solusi yang optimum. Penguatan K_{fi} dan K_{pi} kontroler PI dan penguatan kontrol optimal K_{op} yang optimum hasil dari penalaan AIS diinputkan ke nilai referensi beban pada unit *governor* (*set point load governor*) yang dideskripsikan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.43 *Fuzzy Tuning* Kontroler PI dan Kontrol Optimal LQR Ditala Menggunakan AIS Diaplikasikan pada Sistem LFC Sistem Tenaga Listrik

Tahapan berikutnya ialah menguji pengaruh *Fuzzy Tuning PI* dan penguatan kontrol optimal K_{op} terhadap kinerja sistem. Upaya ini dilakukan dengan cara membandingkan hasil sistem yang menggunakan kontroler integral, kontroler PI, kontroler PI digabung dengan kontrol optimal K_{op} , *Fuzzy Tuning PI* yang digabung dengan kontrol optimal K_{op} secara *trial-error*, *Fuzzy Tuning PI* yang digabung dengan kontrol optimal LQR menggunakan *Artificial Immune System* (AIS) via *Clonal Selection*.

Dalam hal ini, sistem diberi gangguan berupa perubahan permintaan daya dari beban.

4.2. Data Parameter Sistem

Model sistem *Load Frequency Control* pada sistem tenaga listrik dua area yang digunakan berasal dari referensi [4], dan data parameter sistem yang digunakan diperoleh dari referensi [3,27]. Sistem *Load Frequency Control* (LFC) sistem tenaga listrik interkoneksi dua area yang disimulasikan merupakan jaring sistem tenaga listrik yang terdiri atas dua buah pembangkit dengan jumlah dua bus. Representasi sistem tenaga listrik dua area menggunakan data dari dua tabel di bawah ini. Data tersebut digunakan sebagai kondisi awal dengan nilai yang tetap. Rating mesin *synchronous* yang digunakan pada area 1 dan area 2 adalah 2000 MW dan 2200 MW [3,27].

Tabel 2.3 Data Parameter Sistem [3,27]

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
M_1	6,0 detik	T_{CH1}	0,35 detik
M_2	8,0 detik	T_{CH2}	0,4 detik
R_1	2,4 Hz/p.u	T_{g1}	0,04 detik
R_2	3,2 Hz/p.u	T_{g2}	0,5 detik
B_1	$(1/R_1)+D_1$ p.u/Hz	B_2	$(1/R_1)+D_1$ p.u/Hz
T	0,62 p.u		

Tabel 2.4 Nilai Parameter Kontroler PI

Parameter	Nilai
K_{I1}	0,3
K_{I2}	0,25
K_{P1}	0,8
K_{P2}	0,9

Fuzzy Logic

Fuzzy Logic sebagai kontroler merupakan susunan yang memuat aturan-aturan kontroler yang ditentukan berdasarkan pengetahuan, pengamatan, dan pengenalan respons dari objek yang akan dikontrol.

Aturan-aturan tersebut dinyatakan dalam variabel-variabel linguistik. Metode-metode perancangan FLC menggabungkan aspek pendefinisian himpunan *fuzzy* agar diperoleh suatu kontroler yang mampu mewakili cara kerja operator manusia. Melalui prosedur perancangan tertentu, kedua aspek diterapkan pada masukan dan keluaran agar dapat memberikan hasil perancangan berupa algoritma aturan *fuzzy*. Pada beberapa penerapan kontroler *fuzzy* menggunakan *rule-rule* yang telah baku. Keuntungan menggunakan logika *fuzzy* sebagai kontroler antara lain:

1. Tidak perlu model matematik rumit sehingga proses perancangan sistem kontrol menjadi lebih mudah.
2. Aturan *fuzzy* bersifat sederhana sehingga mudah dimengerti.
3. Memiliki fleksibilitas tinggi karena mudah untuk mengubah aturan atau *rule* sesuai dengan kebutuhan.
4. Merupakan model yang independen, memiliki kekokohan tinggi, dan juga mampu beradaptasi.

Fuzzy Logic di sini difungsikan untuk mentala parameter Kontroler PI. Sistem *Fuzzy* yang digunakan terdiri dari dua input dan dua *output*. *Fuzzy Logic* diaplikasikan pada masing-masing area dengan parameter fungsi keanggotaan sama. Terdapat dua input yaitu ACE_i dan ΔACE_i , serta dua *output* (*Output FL*) yaitu K_{ji} dan K_{pi} yang nantinya diumpanbalikkan ke sistem sebagai penguat, lalu digabung dengan penguat kontroler optimal K_{op} dan diinputkan ke nilai referensi beban pada unit *governor* (*set point load governor*). Hal ini dilakukan untuk memperbaiki *output* performansi sistem.

Proses pengolahan pada *Fuzzy Logic* untuk menghasilkan sinyal *output* terkontrol diawali dengan pengenalan kuantitas (*range*) dan penentuan fungsi keanggotaan (*Membership Function*) input dan *output*. Selanjutnya fuzzifikasi setiap input *Fuzzy Logic* dari hasil ini diperoleh nilai derajat tiap himpunan *fuzzy* yang ada untuk masing-masing input. Hasil fuzzifikasi akan dimasukkan ke dalam sistem pengambil keputusan (*system inference fuzzy*) yang dikenal dengan aturan dasar (*rule base*). Aturan-aturan dasar ini memuat aturan yang menghubungkan antara

input dan *output*. Setelah keputusan telah diambil, proses defuzzifikasi pun dilakukan. Proses defuzzifikasi adalah proses pemetaan dari hasil aksi kontrol inferensi *fuzzy*. Metode defuzzifikasi yang digunakan ialah metode center of area, dengan tujuan agar menghasilkan aksi kontrol *non-fuzzy* (*crisp*) yang mewakili distribusi kemungkinan dari hasil kontrol inferensi *fuzzy*.

Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Menggunakan Metode *Trial and Error*

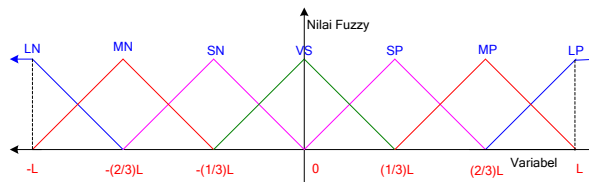
Berdasarkan hasil parameter *Fuzzy Logic* menggunakan metode *trial and error*, kita dapat tentukan bahwa fungsi keanggotaan *Fuzzy Logic* yang digunakan ialah segitiga simetris. Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_i dan ΔACE_i dibagi dalam tujuh triangular *fuzzy* fungsi keanggotaan (*Membership Function*), dengan definisi sebagai berikut.

$L = 0.2$;

L = Semesta Pembicaraan/*Range Input*;

LN(Large Negative)	= [	-L	-L	$-(2/3) \times L$]
MN(Medium Negative)	= [	-L	$-(2/3) \times L$	$-(1/3) \times L$]
SN(Small Negative)	= [	$-(2/3) \times L$	$-(1/3) \times L$	0]
VS(Very Small)	= [	$-(1/3) \times L$	0	$(1/3) \times L$]
SP(Small Positive)	= [	0	$(1/3) \times L$	$(2/3) \times L$]
MP(Medium Positive)	= [	$(1/3) \times L$	$(2/3) \times L$	L]
LP(Large Positive)	= [	$(2/3) \times L$	L	L]

Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.44 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_i dan ΔACE_i

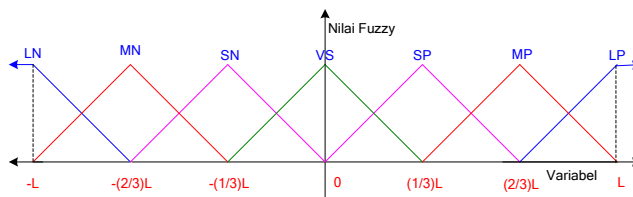
Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel output K_{ij} , dibagi dalam tujuh triangular fuzzy fungsi keanggotaan (*Membership Function*) dengan definisi-definisi sebagai berikut.

$L = 2;$

$L =$ Semesta Pembicaraan/*Range Input*;

LN(Large Negative)	= [	-L	-L	$-(2/3) \times L$]
MN(Medium Negative)	= [	-L	$-(2/3) \times L$	$-(1/3) \times L$]
SN(Small Negative)	= [	$-(2/3) \times L$	$-(1/3) \times L$	0]
VS(Very Small)	= [	$-(1/3) \times L$	0	$(1/3) \times L$]
SP(Small Positive)	= [	0	$(1/3) \times L$	$(2/3) \times L$]
MP(Medium Positive)	= [	$(1/3) \times L$	$(2/3) \times L$	L]
LP(Large Positive)	= [	$(2/3) \times L$	L	L]

Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2.45 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input K_{ii}

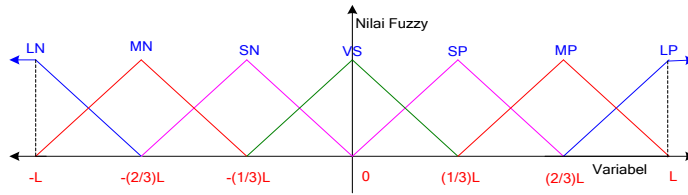
Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel output K_{pi} , dibagi dalam tujuh triangular fuzzy fungsi keanggotaan (*Membership Function*) dengan definisi-definisi sebagai berikut.

$L = 5;$

$L =$ Semesta Pembicaraan/*Range Input*;

LN(Large Negative)	= [	-L	-L	$-(2/3) \times L$]
MN(Medium Negative)	= [	-L	$-(2/3) \times L$	$-(1/3) \times L$]
SN(Small Negative)	= [	$-(2/3) \times L$	$-(1/3) \times L$	0]
VS(Very Small)	= [	$-(1/3) \times L$	0	$(1/3) \times L$]
SP(Small Positive)	= [	0	$(1/3) \times L$	$(2/3) \times L$]
MP(Medium Positive)	= [	$(1/3) \times L$	$(2/3) \times L$	L]
LP(Large Positive)	= [	$(2/3) \times L$	L	L]

Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.46 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{pi}

Rules

Aturan (*rule*) untuk $output K_{ij}$ dan K_{pi} yang digunakan sama seperti data pada tabel di bawah ini. Mekanisme inferensi *Fuzzy Logic* direpresentasikan oleh 7x7 tabel aturan (*rule*) yang secara keseluruhan memuat 49 aturan (*rule*).

Tabel 2.5 Tabel Aturan Fuzzy

ΔACE_i ACE_i	LN	MN	SN	VS	SP	MP	LP
LP	VS	SP	MP	LP	LP	LP	LP
MP	SN	VS	SP	MP	MP	LP	LP
SP	MN	SN	VS	SP	SP	MP	LP
VS	MN	MN	SN	VS	SP	MP	MP
SN	LN	MN	SN	SN	VS	SP	MP
MN	LN	LN	MN	MN	SN	VS	SP
LN	LN	LN	LN	LN	MN	SN	VS

Aturan fuzzy untuk penguatan K_{pi} dan K_{ij} adalah:

If ACE_i is A_1^i and ΔACE_i is A_1^i then Gain Proportional is Z_1^i and Gain Integral is Z_2^i

dengan A_1^i , A_1^i , Z_1^i , dan Z_2^i adalah himpunan fuzzy rule ke-i.

Aplikasi Artificial Immune System (AIS) via Clonal Selection

Matriks pembobot Q dan R , dan parameter FLC dilakukan pengkodean ke dalam antibodi. Struktur Q dan R dihubungkan dengan jumlah elemen yang bergantung pada jumlah variabel keadaan (n) dan jumlah variabel input (m). Dalam hal ini, sistem menghasilkan 9 variabel keadaan, yaitu $\Delta f_1, \Delta P_{m1}, \Delta P_{G1}, \Delta P_{tie}, \Delta f_2, \Delta P_{m2}, \Delta P_{G2}, \otimes z_1$, dan $\otimes z_2$ dan 2 variabel input, yaitu $\otimes P_{c1}$ dan $\otimes P_{c2}$. Oleh karena itu, matriks pembobot Q dan R secara berturut-turut dapat dibuat dalam ukuran 9x9 dan 2x2 sebagai berikut.

$$Q = \begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} & q_{1,3} & \bullet & q_{1,9} \\ q_{2,1} & q_{2,2} & q_{2,3} & \bullet & \bullet \\ q_{3,1} & q_{3,2} & q_{3,3} & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet & \bullet & \bullet \\ q_{9,1} & \bullet & \bullet & \bullet & q_{9,9} \end{bmatrix} \quad (4-1)$$

dan

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} \\ r_{2,1} & r_{2,2} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

Matriks pembobot Q dan R pada Persamaan (4-1) dan (4-2) dituliskan dalam matriks diagonal sebagai berikut,

$$Q = \begin{bmatrix} 0.07 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.07 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.07 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.07 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.07 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

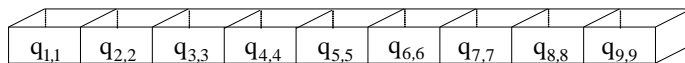
$$R = \begin{bmatrix} 0.02 & 0 \\ 0 & 0.02 \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

Data parameter sistem [3,27], nilai parameter kontroler PI, Persamaan (4-3), Persamaan (4-4) digunakan sebagai awal sistem. Harga Range Input ACE_i , ΔACE_i , output K_{ij} , K_{pi} parameter Fuzzy Logic dan rule

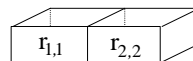
yang digunakan sesuai dengan apa yang disampaikan di pembahasan sebelumnya.

Matriks Pembobot Q dan R , dan Parameter *Fuzzy Logic* dalam Bentuk Struktur Antibodi

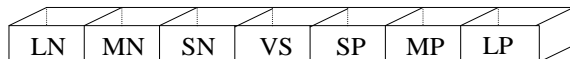
Struktur antibodi Q dan R kontrol optimal LQR, parameter *Fuzzy Logic* ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Antibodi matriks Q terdiri atas sembilan gen yang mewakili jumlah matriks pembobot Q dengan jumlah elemen bergantung pada jumlah variabel keadaan sistem. Antibodi matriks R terdiri atas dua gen yang mewakili jumlah matriks pembobot R dengan jumlah elemen bergantung pada jumlah *variable input* sistem. Antibodi parameter *Fuzzy Logic* terdiri dari lima puluh enam gen yang mewakili titik-titik tengah atau puncak pada fungsi keanggotaan variabel input dan *output Fuzzy Logic* yang menggunakan fungsi segitiga. Pengaturan variabel masing-masing puncak fungsi keanggotaan input ACE_i , ΔACE_i dan *output* K_{ji} , K_{pi} dapat dilihat pada tabel-tabel berikut.



Struktur antibodi matriks Q



Struktur antibodi matriks R



Struktur antibodi input ACE_i , ΔACE_i , *output* K_{ji} , K_{pi}

Gambar 2.47 Matriks Q , R dan Parameter *Fuzzy Logic* dalam Bentuk Struktur Antibodi

Tabel 2.6 Variable Ranges Setting Masing-Masing Puncak Membership Function $ACE_i, \Delta ACE_i$

Himpunan Fuzzy	Range Puncak
NB	-0.20 ~ -0.133
NM	-0.133 ~ -0.0667
NS	-0.0667 ~ -0
VS	0 (Tetap)
PS	0 ~ 0.0667
PM	0.0667 ~ 0.133
PB	0.133 ~ 0.2

Tabel 2.7 Variable Ranges Setting Masing-Masing Puncak Membership Function K_{ij}

Himpunan Fuzzy	Range Puncak
NB	-2 ~ -1.33
NM	-1.33 ~ -0.667
NS	-0.667 ~ -0
VS	0 (Tetap)
PS	0 ~ 0.667
PM	0.667 ~ 1.33
PB	1.33 ~ 2

Tabel 2.8 Variable Ranges Setting Masing-Masing Puncak Membership Function K_{pj}

Himpunan Fuzzy	Range Puncak
NB	-5 ~ -3.33
NM	-3.33 ~ -1.667
NS	-1.667 ~ -0
VS	0 (Tetap)
PS	0 ~ 1.667
PM	1.667 ~ 3.33
PB	3.33 ~ 5

Pengenalan Antigen

Dalam *Clonal Selection*, input dianggap sebagai antigen yang menyerang tubuh. Pada pemilihan matriks pembobot Q dan R pada kontrol optimal LQR, parameter *Fuzzy Logic*, input antigen merupakan

matriks sistem **A** dan matriks input **B**. Matriks-matriks itu selanjutnya digunakan dalam suatu fungsi objektif untuk memperoleh batasan-batasan yang diperlukan dalam proses *Clonal Selection*.

Populasi Antibodi

Untuk memperoleh antibodi yang sesuai, dibutuhkan populasi awal antibodi-antibodi untuk menghadapi antigen yang ada. Populasi ini terdiri atas n , jumlah antibodi dalam populasi dan l , dan jumlah gen pada masing-masing antibodi. Dalam proses ini, 10 populasi dibangkitkan dan masing-masing populasi terdiri dari 100 macam antibodi untuk simulasi studi kasus 1 s.d. studi kasus 3, sementara untuk studi kasus 4 masing-masing populasi terdiri dari 50 macam antibodi. Semua populasi ini merupakan representasi populasi matriks pembobot **Q** dan populasi matriks pembobot **R** kontrol optimal LQR, serta populasi parameter *Fuzzy Logic*. Antibodi di populasi matriks pembobot **Q** memiliki 9 gen yang disesuaikan dengan ukuran matriks sistem **A** yaitu 9×9 . Sedangkan antibodi yang ada di dalam populasi matriks pembobot **R** memiliki 2 gen yang disesuaikan dengan ukuran matriks input **B** yaitu 2×2 . Jika terjadi perubahan pada matriks input **B**, maka antibodi untuk matriks pembobot **R** disesuaikan dengan perubahan yang terjadi akibat perubahan input. Antibodi pada populasi parameter FLC adalah lima puluh enam gen yang merepresentasikan jumlah titik tengah atau puncak pada fungsi keanggotaan variabel input ACE_i , ΔACE_i , dan *output* K_{li} , K_{pi} FLC dengan menggunakan fungsi segitiga. FLC dipasang pada masing-masing area kontrol pada sistem tenaga.

Seleksi dan Perhitungan Affinity

Affinity merupakan kekuatan ikatan antara *receptor* yang ada pada antibodi dan *epitope* pada antigen. Nilai *affinity* yang tinggi suatu antibodi menunjukkan bahwa ia memiliki spesifikasi yang bagus dalam mengatasi antigen. Nilai *affinity* suatu antibodi dapat diketahui melalui hasil perhitungan fungsi objektif. Fungsi objektif yang diusulkan adalah sebagai berikut.

$$J = \left(\int_0^{t_f} (ACE_1(t)^2 + ACE_2(t)^2) dt \right) + \frac{1}{2} x^T(t) S(t) x(t) \quad (4-1)$$

Tujuan dari perhitungan *affinity* ialah untuk menyeleksi tiap-tiap antibodi agar dapat diketahui apakah ia bagus atau jelek. Jika antibodi tersebut memiliki nilai *affinity* yang lebih besar, maka antibodi tersebut termasuk dalam kategori bagus, begitu juga sebaliknya. Untuk pemilihan matriks pembobot **Q** dan **R** kontrol optimal LQR dan parameter FLC, antibodi yang mempunyai *affinity* bagus merupakan antibodi yang dapat meminimalisasi fungsi objektif dan berada dalam batasan yang ditetapkan.

Klon

Klon merupakan suatu proses pengembangbiakan antibodi menjadi beberapa antibodi yang sama seperti aslinya. Proses ini melibatkan 10 antibodi terbaik dari masing-masing populasi antibodi, lalu diklon sebanyak yang dibutuhkan untuk tiap-tiap antibodi yang terpilih. Proses klon dilakukan untuk mengembangbiakkan antibodi-antibodi terpilih menjadi populasi yang sama jumlahnya dengan populasi awal.

Hypermutasi

Hypermutasi merupakan mutasi yang terjadi secara serentak, acak dan variatif. Proses hypermutasi dapat terjadi menggunakan peluang mutasi (*mp*). Setiap antibodi memperoleh peluang mutasi yang berbeda yang setelah ini bisa ditentukan apakah antibodi tersebut melakukan mutasi atau tidak. Jika terjadi mutasi, nilai *affinity* masing-masing antibodi akan berubah nilainya. Pada proses ini, masing-masing antibodi memiliki peluang mutasi yang berbeda bergantung pada nilai *affinity*-nya. Antibodi dengan *affinity* tinggi memperoleh peluang mutasi kecil yang tujuannya ialah untuk menjaga antibodi terbaik agar tetap dipertahankan. Sementara antibodi dengan *affinity* bernilai rendah akan memperoleh peluang mutasi lebih besar agar ia mampu mencari antibodi dengan kombinasi berbeda, sehingga didapatkan peningkatan pada nilai *affinity*.

Seleksi Ulang

Pada proses seleksi ulang (*re-select*), populasi antibodi yang telah mengalami hypermutasi akan diseleksi ulang agar diperoleh 10 antibodi terbaru dari populasi tersebut. Jika terdapat antibodi hasil mutasi tidak memenuhi batasan-batasan yang sudah ditetapkan, maka antibodi ini akan dihilangkan. Tujuan dari seleksi ulang ialah untuk memperoleh antibodi-antibodi hasil mutasi yang bagus. Antibodi hasil seleksi ulang ini nantinya menggantikan populasi antibodi generasi sebelumnya melalui proses-proses yang disebutkan di atas.

Algoritma AIS untuk mentala matriks Q dan R kontrol optimal LQR dan parameter *Fuzzy Logic Controller*

Berikut prosedur komputasi dari metode yang diusulkan:

1. Memasukkan data parameter *governor*, turbin, dan beban dari sistem tenaga listrik yang akan dioptimais.
2. Menentukan matriks **A**, **B**, **C** dan **D** yang stabil, terkontrol dan teramati.
3. Inisialisasi awal populasi antibodi (P_{Ab}) sebagai kandidat solusi sebagai kumpulan antibodi meliputi matriks pembobot **Q** dan **R**, fungsi keanggotaan *fuzzy*.
4. Melakukan perhitungan kontrol optimal LQR dan *fuzzy system tuning* PI pada sistem untuk mengevaluasi tiap-tiap antibodi (Ab) dari populasi antibodi.
5. Menghitung fungsi objektif:

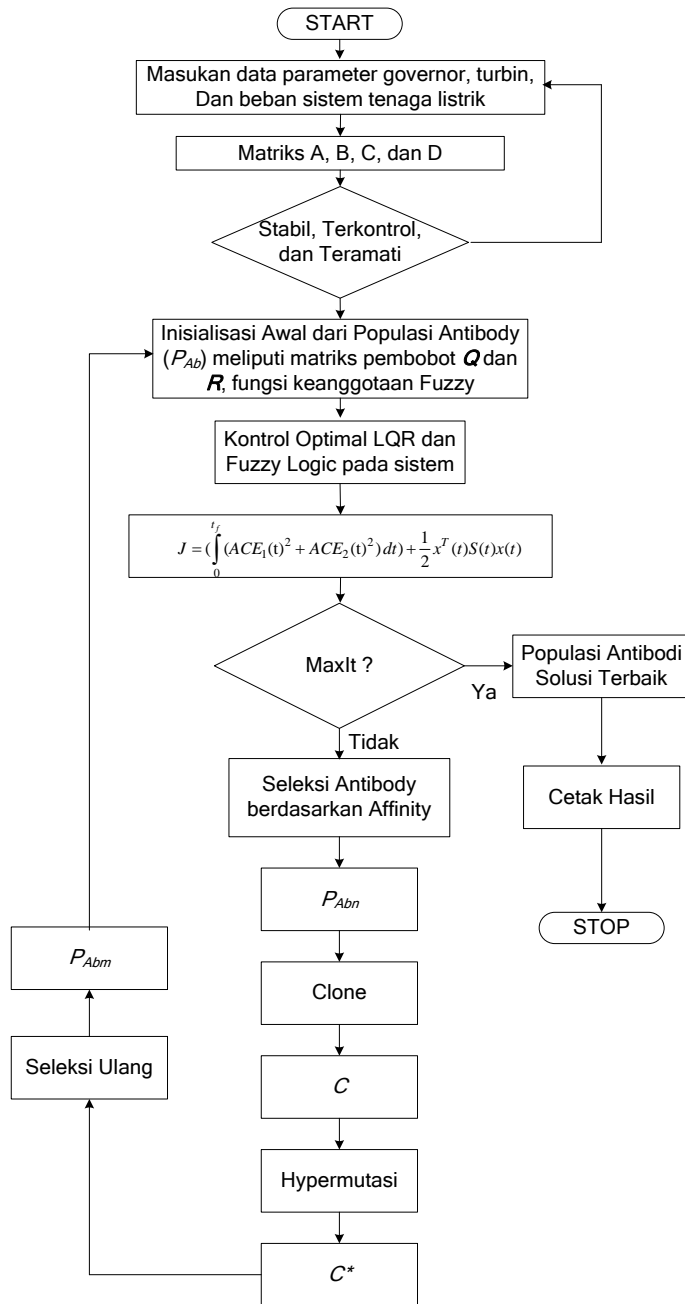
$$J = \left(\int_0^{t_f} (ACE_1(t)^2 + ACE_2(t)^2) dt \right) + \frac{1}{2} x^T(t) S(t) x(t)$$

untuk memperoleh nilai *affinity*.

6. Seleksi n individu-individu terbaik dari populasi (P_{Ab}) yang didasarkan pada pengukuran *affinity*. Individu terbaik merupakan antibodi yang dapat meminimalisir fungsi objektif paling rendah. Individu-individu ini akan membentuk populasi (P_{Abn}).

7. Klon n individu-individu terbaik dari (P_{Abn}) dan memberikan tingkatan untuk populasi sementara dari hasil *clone* (C).
8. Memberikan peluang bagi populasi dari hasil *cloning* agar melakukan hypermutasi, yang proporsional terhadap harga *affinity* dari antibodi. Setelah klon, maka populasi antibodi yang termutasi telah dibangkitkan (C^*).
9. Seleksi kembali individu-individu dari C^* untuk disusun dalam kumpulan memori (P_{Abm}).
10. Mengganti populasi antibodi (P_{Ab}) yang mempunyai *affinity* rendah dengan populasi antibodi yang baru terbentuk (P_{Abm}).
11. Mengulangi Langkah 4 sampai 10 hingga maksimal generasi.

Algoritma dari metode AIS untuk mentala matriks \mathbf{Q} dan \mathbf{R} kontrol optimal LQR dan parameter *Fuzzy Logic Tuning kontroler PI* yang diterapkan di sini dapat dilihat pada berikut.



Gambar 2.48 Algoritma Komputasi

Analisis dan Simulasi

Setelah proses perancangan selesai, selanjutnya ialah analisis dinamik sistem terhadap sistem *Load Frequency Control* (LFC) pada sistem tenaga listrik dua area. Dari simulasi ini kita akan segera memperoleh informasi tentang kinerja dinamik sistem berdasar deviasi frekuensi area 1 dan area 2, serta deviasi daya *tie-line* untuk membandingkan aplikasi strategi kontrol pada sistem.

Studi Kasus 1

Pada studi kasus 1, sistem diberi gangguan dengan perubahan permintaan beban meningkat di area satu sebesar 100 MW atau 0.05 p.u.

Tanpa Kontroler:

Perubahan beban area 1 sebesar: 100 MW

Base: 2000 MVA

Perubahan beban area 1 dalam satuan p.u:

$$\Delta P_{L1} = \frac{100}{2000} = 0.05 \text{ pu}$$

Deviasi frekuensi *steady-state* dalam satuan p.u:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{ss} &= \frac{-\Delta P_{L1}}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \\ &= \frac{-0.05}{\left(\frac{1}{2.4} + 1.5\right) + \left(\frac{1}{3.2} + 2\right)} \\ &= -0.0118226601 \text{ pu}\end{aligned}$$

Deviasi frekuensi *steady-state* dalam satuan Hz:

$$\Delta f = (-0.0118226601) \times 50 = -0.591133005 \text{ Hz}$$

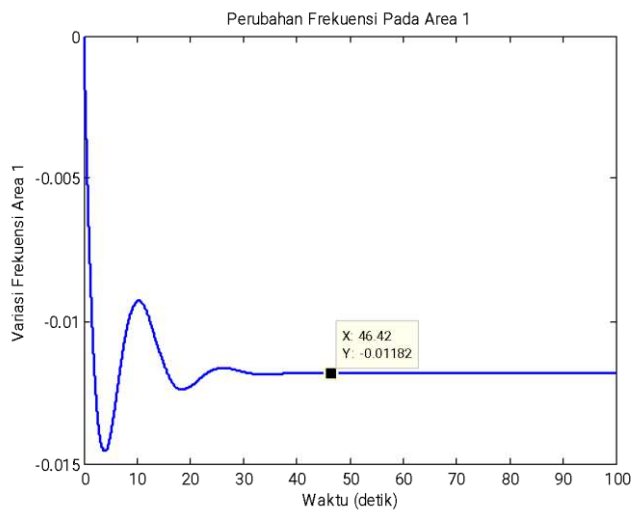
Frekuensi yang baru:

$$f = f_0 + \Delta f = 50 - 0.591133005 = 49.408867 \text{ Hz}$$

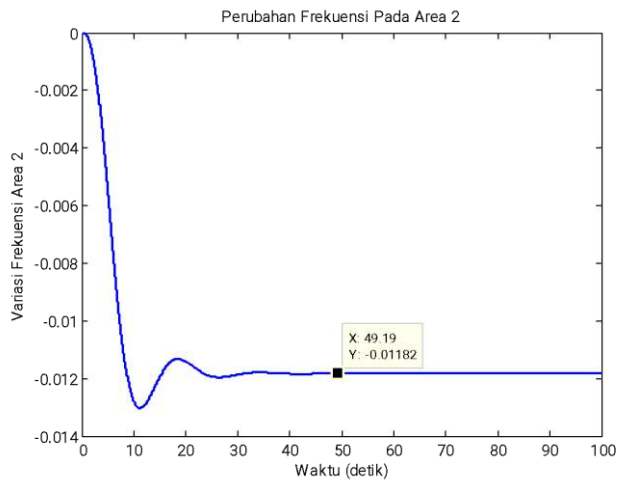
Perubahan daya *tie-line*:

$$\begin{aligned}\Delta P_{12} &= \Delta\omega\left(\frac{1}{R_2} + D_2\right) = (-0.0118226601) \times 2.3125 \\ &= 0.002733990148 \text{ pu} = 5.46798 \text{ MW}\end{aligned}$$

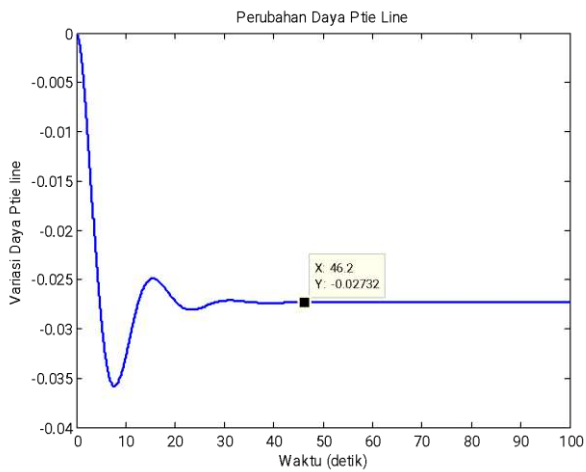
Hasil analisis dapat dipelajari pada gambar-gambar di bawah ini. Dua gambar pertama menunjukkan, bahwa setelah sistem diberi gangguan berupa perubahan kenaikan beban pada area 1, perubahan frekuensi sistem pada area 1 dan area 2 sebesar 0.0118226601 p.u atau mengalami penurunan frekuensi sebesar 0.591133005 Hz pada area 1 dan area 2. Setelah terjadi perubahan beban pada area 1, sistem berada pada frekuensi *steady-state* yang baru yaitu 49.408867 Hz. Sementara gambar ketiga menunjukkan, bahwa setelah perubahan beban di area 1, maka akan terjadi perubahan daya *tie-line* sebesar 0.002733990148 p.u atau sebesar 5.46798 MW.



Gambar 2.49 Deviasi Frekuensi Area 1



Gambar 2.50 Deviasi frekuensi area



Gambar 2.51 Deviasi Daya *Tie-Line*

Menggunakan Kontroler:

Parameter AIS yang digunakan dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Klon diterapkan pada 100 antibodi dengan jumlah klon tiap antibodi sebesar 10 antibodi. Mutasi diberikan pada 100 antibodi dengan *affinity*

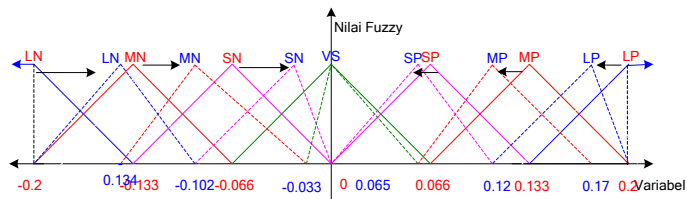
yang berbeda. Semakin bagus nilai *affinity*, nilai peluang yang diberikan akan semakin kecil.

Tabel 2.9 Parameter AIS

No	Parameter	Nilai
1	Jumlah Iterasi	70
2	Jumlah Antibodi	100
3	Jumlah Gen	67
4	Jumlah Klon	10 / Ab
5	Peluang Mutasi	[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]

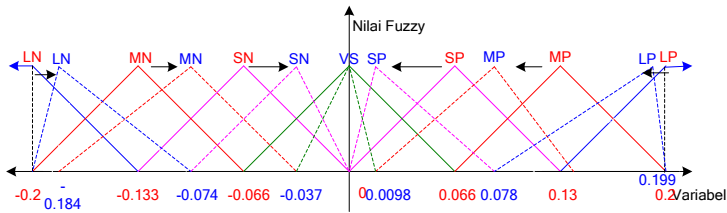
Hasil penalaan parameter fungsi keanggotaan *fuzzy* sistem pada area 1 sistem tenaga listrik menunjukkan, bahwa fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_1 , ΔACE_1 , K_{11} , dan K_{p1} dibagi dalam tujuh triangular *fuzzy* fungsi keanggotaan (*Membership Function*). Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) tersebut dapat dilihat pada gambar-gambar di bawah ini. Ketujuh fungsi keanggotaan (*Membership Function*) didefinisikan sebagai berikut.

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.1334	-0.102]
MN(Medium Negative)	= [	-0.1334	-0.102	-0.033]
SN(Small Negative)	= [	-0.102	-0.033	0]
VS(Very Small)	= [	-0.033	0	0.065]
SP(Small Positive)	= [	0	0.065	0.12]
MP(Medium Positive)	= [	0.065	0.12	0.17]
LP(Large Positive)	= [	0.12	0.17	0.2]



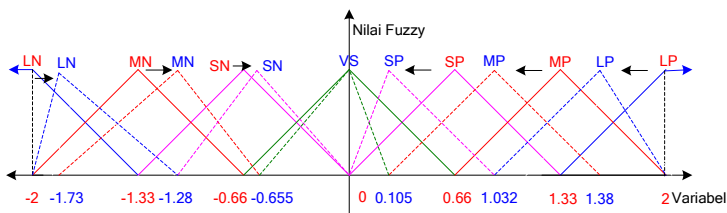
Gambar 2.52 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_1

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.184	-0.074]
MN(Medium Negative)	= [	-0.184	-0.074	-0.037]
SN(Small Negative)	= [	-0.074	-0.037	0]
VS(Very Small)	= [	-0.037	0	0.0098]
SP(Small Positive)	= [	0	0.0098	0.078]
MP(Medium Positive)	= [	0.0098	0.078	0.199]
LP(Large Positive)	= [	0.078	0.199	0.2]



Gambar 2.53 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ΔACE_1

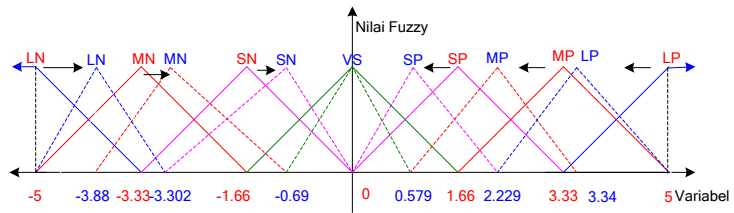
LN(Large Negative)	= [	-2	-1.73	-1.28]
MN(Medium Negative)	= [	-1.73	-1.28	-0.655]
SN(Small Negative)	= [	-1.28	-0.655	0]
VS(Very Small)	= [	-0.655	0	0.105]
SP(Small Positive)	= [	0	0.105	1.032]
MP(Medium Positive)	= [	0.105	1.032	1.38]
LP(Large Positive)	= [	1.032	1.38	2]



Gambar 2.54 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{11}

LN(Large Negative)	= [	-5	-3.88	-3.302]
MN(Medium Negative)	= [	-3.88	-3.302	-0.69]
SN(Small Negative)	= [	-3.302	-0.69	0]
VS(Very Small)	= [	-0.69	0	0.579]

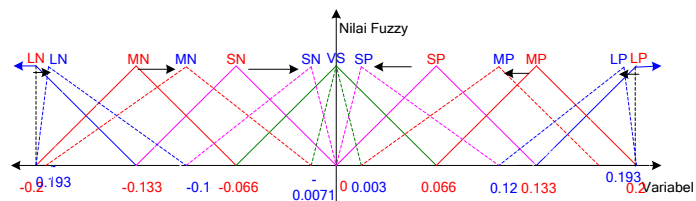
SP(Small Positive)	= [	0	0.579	2.229]
MP(Medium Positive)	= [	0.579	2.229	3.34]
LP(Large Positive)	= [	2.229	3.34	5]



Gambar 2.55 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{p1}

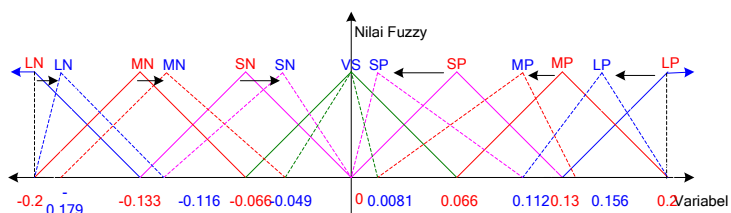
Hasil penalaan parameter fungsi keanggotaan *fuzzy* sistem pada area 2 sistem tenaga listrik menunjukkan, bahwa fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_2 , ΔACE_2 , K_{I2} , dan K_{p2} dibagi dalam tujuh triangular *fuzzy* fungsi keanggotaan (*Membership Function*). Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) tersebut dapat dilihat pada gambar-gambar berikut.

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.193	-0.1]
MN(Medium Negative)	= [	-0.193	-0.1	-0.071]
SN(Small Negative)	= [	-0.1	-0.071	0]
VS(Very Small)	= [	-0.071	0	0.003]
SP(Small Positive)	= [	0	0.003	0.12]
MP(Medium Positive)	= [	0.003	0.12	0.193]
LP(Large Positive)	= [	0.12	0.193	0.2]



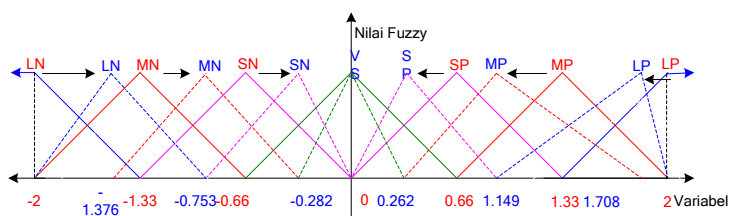
Gambar 2.56 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_2

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.184	-0.074]
MN(Medium Negative)	= [	-0.184	-0.074	-0.037]
SN(Small Negative)	= [	-0.074	-0.037	0]
VS(Very Small)	= [	-0.037	0	0.0098]
SP(Small Positive)	= [	0	0.0098	0.078]
MP(Medium Positive)	= [	0.0098	0.078	0.199]
LP(Large Positive)	= [	0.078	0.199	0.2]



Gambar 2.57 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ΔACE_2

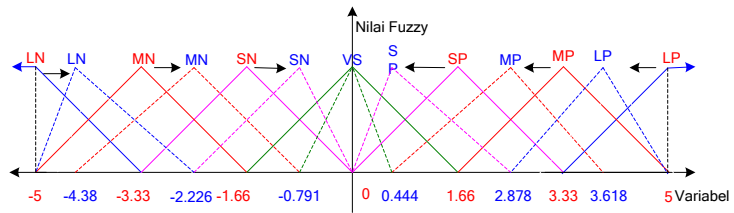
LN(Large Negative)	= [	-2	-1.376	-0.753]
MN(Medium Negative)	= [	-1.376	-0.753	-0.282]
SN(Small Negative)	= [	-0.753	-0.282	0]
VS(Very Small)	= [	-0.282	0	0.262]
SP(Small Positive)	= [	0	0.262	1.149]
MP(Medium Positive)	= [	0.262	1.149	1.708]
LP(Large Positive)	= [	1.149	1.708	2]



Gambar 2.58 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{12}

LN(Large Negative)	= [	-5	-4.38	-2.226]
MN(Medium Negative)	= [	-4.38	-2.226	-0.791]
SN(Small Negative)	= [	-2.226	-0.791	0]
VS(Very Small)	= [	-0.791	0	0.444]

SP(Small Positive)	= [	0	0.444	2.878]
MP(Medium Positive)	= [	0.444	2.878	3.618]
LP(Large Positive)	= [	2.878	3.618	5]



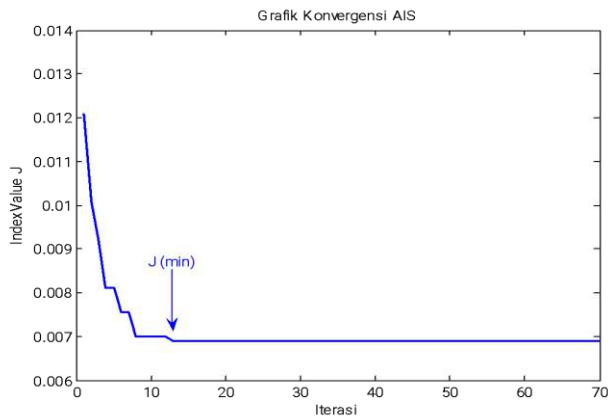
Gambar 2.59 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{p2}

Matriks pembobot Q dan R optimal adalah sebagai berikut,

$$Q = [35.3414 \ 31.2454 \ 0 \ 30 \ 10.5404 \ 48.8392 \ 12.1068 \ 60.4127 \ 0]$$

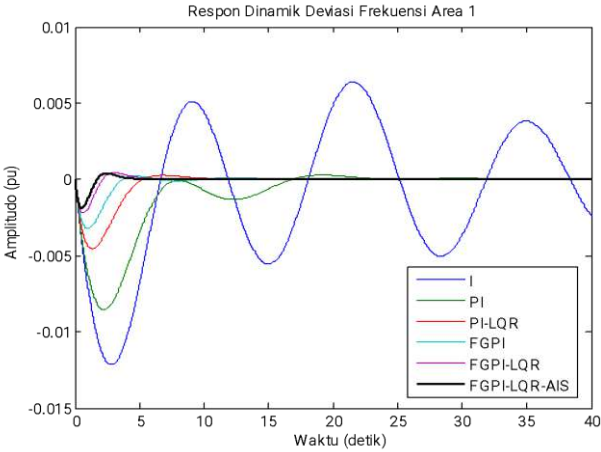
$$R = [1 \ 1]$$

Kurva konvergensi AIS dalam menala parameter matriks pembobot Q dan R kontrol optimal LQR dan *Fuzzy Logic* dapat dilihat pada gambar berikut. Kurva tersebut menunjukkan bahwa J minimum dicapai pada generasi ke-13.

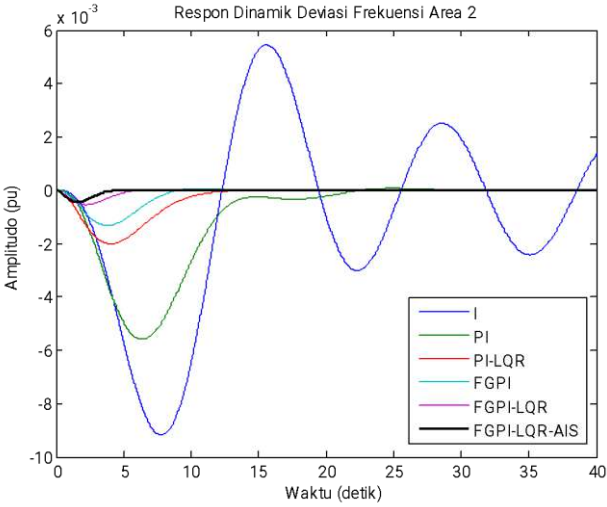


Gambar 2.60 Konvergensi AIS

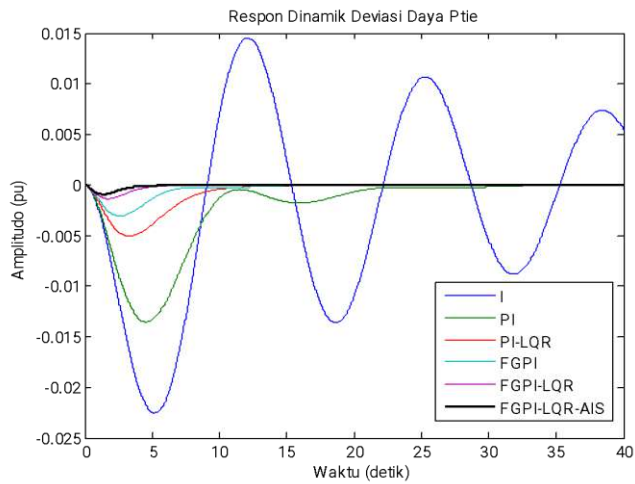
Respons *output* performansi deviasi frekuensi area 1, area 2, dan daya *tie-line* pada studi kasus 1 ini ditunjukkan pada gambar-gambar di bawah ini.



Gambar 2.61 Deviasi Frekuensi Area 1



Gambar 2.62 Deviasi Frekuensi Area 2



Gambar 2.63 Deviasi Daya *Tie-Line*

Perbandingan respons dinamik sistem dari gambar-gambar di atas dapat dilihat pada dua tabel berikut ini.

Tabel 2.10 Data *Overshoot* Gambar 4.24 sampai Gambar 4.26 dalam p.u

	Kontroler Integral	Kontroler PI	PI-LQR	FGPI
Δf_1	-0.01215	-0.008506	-0.00455	-0.003196
Δf_2	-0.009183	-0.0056	-0.002008	-0.001326
ΔP_{tie}	-0.02252	-0.01354	-0.005053	-0.003052
	FGPI-LQR	FGPI-LQR ditala menggunakan AIS		
Δf_1	-0.002191	-0.00181		
Δf_2	-0.000523	-0.0004459		
ΔP_{tie}	-0.001383	-0.0009332		

Tabel 2.11 Data *Settling Time* Gambar 4.24 sampai Gambar 4.26 dalam detik

	Kontroler Integral	Kontroler PI	PI-LQR	FGPI
Δf_1	153.2	28.19	23.61	18.47
Δf_2	154.7	31.97	19.75	17.61
ΔP_{tie}	157.2	33.02	19.32	18.11
	FGPI-LQR	FGPI-LQR ditala menggunakan AIS		
Δf_1	11.16	8.36		
Δf_2	13.85	9.48		
ΔP_{tie}	11.41	10.39		

Dua tabel di atas menunjukkan, bahwa metode kontrol yang diusulkan dapat menekan osilasi deviasi frekuensi area 1, area 2, dan deviasi daya *tie-line* (jaring) sistem dan memperbaiki respons dinamik sistem.

Studi Kasus 2

Pada studi kasus 2, sistem diberi gangguan dengan perubahan permintaan beban yang meningkat di area satu sebesar 200 MW atau 0.1 p.u.

Tanpa Kontroler:

Perubahan beban area 1 sebesar: 200 MW

Base: 2000 MVA

Perubahan beban area 1 dalam satuan p.u:

$$\Delta P_{L1} = \frac{200}{2000} = 0.1 \text{ pu}$$

Deviasi frekuensi *steady-state* dalam satuan p.u:

$$\Delta \omega_{ss} = \frac{-\Delta P_{L1}}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{-0.1}{\left(\frac{1}{2.4} + 1.5\right) + \left(\frac{1}{3.2} + 2\right)} \\
&= -0.0236453202 \text{ pu}
\end{aligned}$$

Deviasi frekuensi *steady-state* dalam satuan Hz:

$$\Delta f = (-0.0236453202) \times 50 = -1.18226601 \text{ Hz}$$

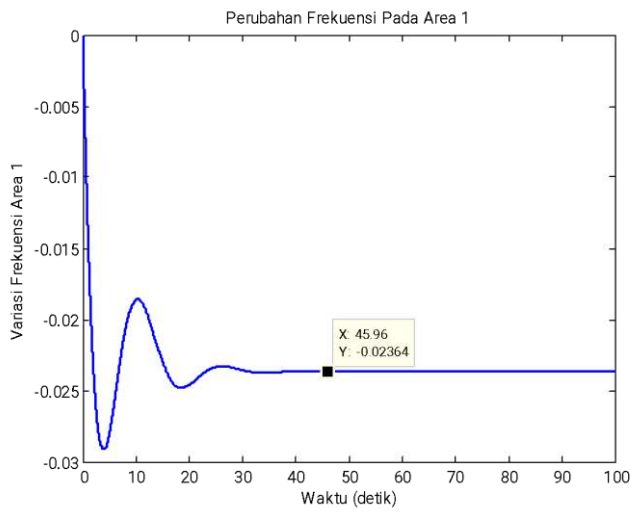
Frekuensi yang baru:

$$f = f_0 + \Delta f = 50 - 1.18226601 = 48.81773399 \text{ Hz}$$

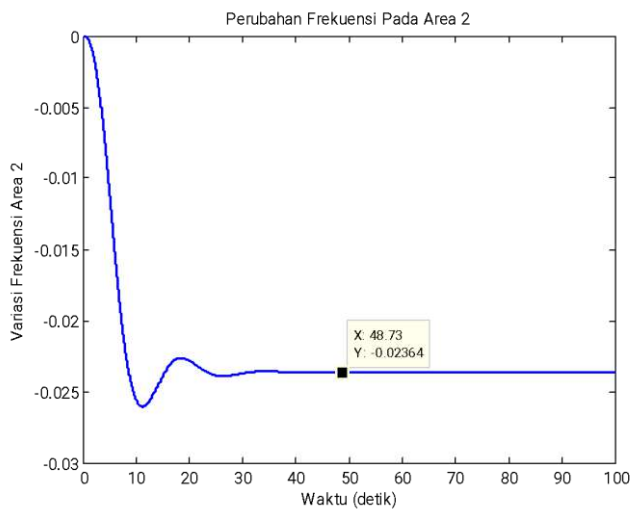
Perubahan daya jaring:

$$\begin{aligned}
\Delta P_{12} &= \Delta \omega \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right) = (-0.0236453202) \times 2.3125 \\
&= 0.05467980296 \text{ pu} = 109.3596059 \text{ MW}
\end{aligned}$$

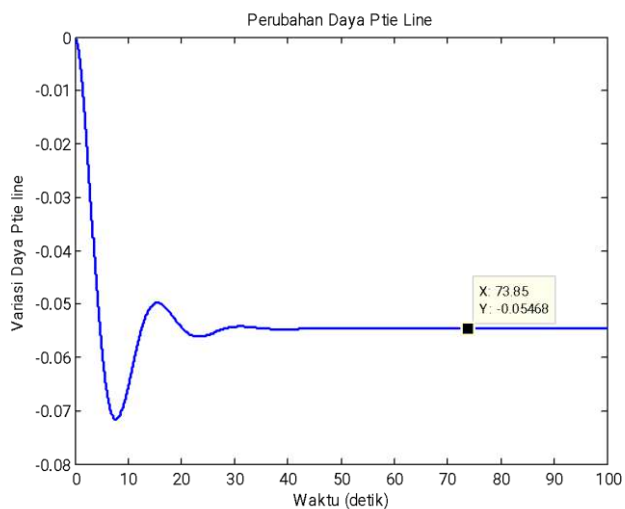
Hasil analisis di atas dapat divisualisasikan melalui gambar-gambar di bawah ini. Dalam hal ini kita ketahui, bahwa setelah sistem diberi gangguan berupa perubahan kenaikan beban pada area 1, perubahan frekuensi sistem pada area 1 dan area 2 sebesar 0.023645320 p.u atau mengalami penurunan frekuensi sebesar 1.18226601 Hz pada area 1 dan area 2. Setelah terjadi perubahan beban pada area 1, sistem berada pada frekuensi *steady-state* yang baru yaitu 48.81773399Hz. Gambar ketiga di bawah ini menunjukkan adanya perubahan beban di area 1 yang berhasil mengubah daya *tie-line* sebesar 0.05467980296 p.u atau sebesar 109.3596059 MW.



Gambar 2.64 Deviasi Frekuensi Area 1



Gambar 2.65 Deviasi Frekuensi Area 2



Gambar 2.66 Deviasi Daya *Tie-Line*

Menggunakan Kontroler:

Parameter AIS yang digunakan dapat dilihat melalui gambar di bawah ini. Klon diterapkan pada 100 antibodi dengan jumlah klon tiap antibodi sebesar 10 antibodi. Mutasi diberikan pada 100 antibodi dengan *affinity* yang berbeda. Semakin bagus nilai *affinity*, maka diberikan nilai peluang yang kecil.

Tabel 2.12 Parameter AIS

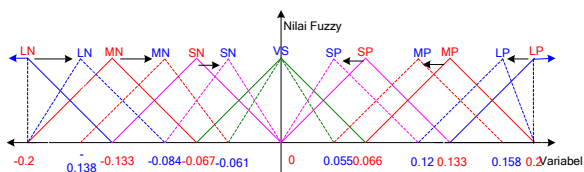
No	Parameter	Nilai
1	Jumlah Iterasi	70
2	Jumlah Antibodi	100
3	Jumlah Gen	67
4	Jumlah Klon	10 / Ab
5	Peluang Mutasi	[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]

Hasil penalaan parameter fungsi keanggotaan *fuzzy* sistem pada area 1 sistem tenaga listrik,

Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_1 , ΔACE_1 , K_{1L} , dan K_{p1} dibagi dalam tujuh triangular fuzzy fungsi keanggotaan (*Membership Function*) sebagai berikut.

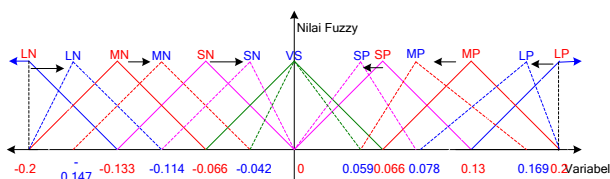
Ketujuh fungsi keanggotaan (*Membership Function*) ini didefinisikan sebagai berikut,

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.130	-0.084]
MN(Medium Negative)	= [	-0.138	-0.084	-0.061]
SN(Small Negative)	= [	-0.084	-0.061	0]
VS(Very Small)	= [	-0.061	0	0.055]
SP(Small Positive)	= [	0	0.055	0.12]
MP(Medium Positive)	= [	0.055	0.12	0.158]
LP(Large Positive)	= [	0.12	0.158	0.2]



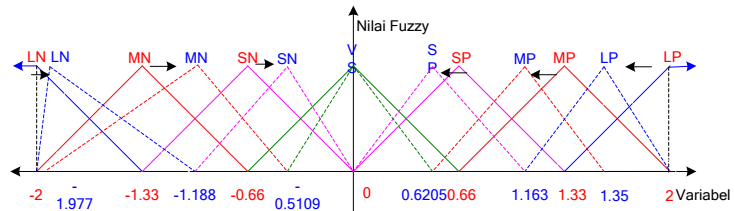
Gambar 2.67 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_1

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.147	-0.114]
MN(Medium Negative)	= [	-0.147	-0.114	-0.042]
SN(Small Negative)	= [	-0.114	-0.042	0]
VS(Very Small)	= [	-0.042	0	0.059]
SP(Small Positive)	= [	0	0.059	0.078]
MP(Medium Positive)	= [	0.059	0.078	0.169]
LP(Large Positive)	= [	0.078	0.169	0.2]



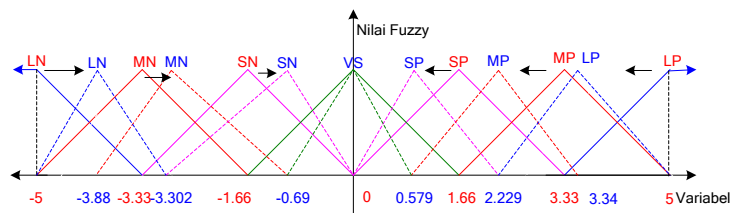
Gambar 2.68 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ΔACE_1

LN(Large Negative)	= [	-2	-1.977	-1.188]
MN(Medium Negative)	= [	-1.977	-1.188	-0.5109]
SN(Small Negative)	= [	-1.188	-0.5109	0]
VS(Very Small)	= [	-0.5109	0	0.6205]
SP(Small Positive)	= [	0	0.6205	1.163]
MP(Medium Positive)	= [	0.6205	1.163	1.35]
LP(Large Positive)	= [	1.163	1.35	2]



Gambar 2.69 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{11}

LN(Large Negative)	= [	-5	-3.88	-3.302]
MN(Medium Negative)	= [	-3.88	-3.302	-0.69]
SN(Small Negative)	= [	-3.302	-0.69	0]
VS(Very Small)	= [	-0.69	0	0.579]
SP(Small Positive)	= [	0	0.579	2.229]
MP(Medium Positive)	= [	0.579	2.229	3.34]
LP(Large Positive)	= [	2.229	3.34	5]



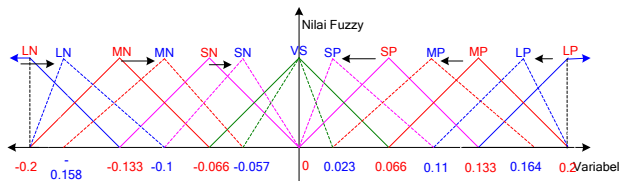
Gambar 2.70 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{p1}

Hasil penalaan parameter fungsi keanggotaan *fuzzy* sistem pada area 2 sistem tenaga listrik,

Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_2 , ΔACE_2 , K_{I2} , dan K_{P2} dibagi dalam tujuh triangular fuzzy fungsi keanggotaan (*Membership Function*) sebagai berikut.

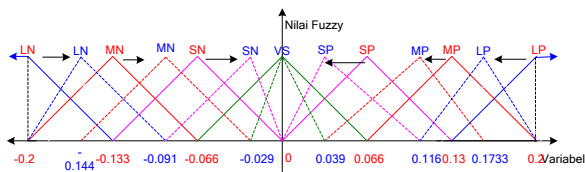
Ketujuh fungsi keanggotaan (*Membership Function*) ini didefinisikan sebagai berikut,

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.158	-0.1]
MN(Medium Negative)	= [	-0.158	-0.1	-0.057]
SN(Small Negative)	= [	-0.1	-0.057	0]
VS(Very Small)	= [	-0.057	0	0.023]
SP(Small Positive)	= [	0	0.023	0.11]
MP(Medium Positive)	= [	0.023	0.11	0.164]
LP(Large Positive)	= [	0.11	0.164	0.2]



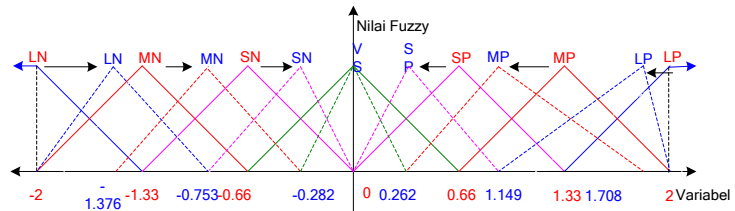
Gambar 2.71 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_2

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.144	-0.091]
MN(Medium Negative)	= [	-0.144	-0.091	-0.029]
SN(Small Negative)	= [	-0.091	-0.029	0]
VS(Very Small)	= [	-0.029	0	0.039]
SP(Small Positive)	= [	0	0.039	0.116]
MP(Medium Positive)	= [	0.039	0.116	0.1733]
LP(Large Positive)	= [	0.116	0.1733	0.2]



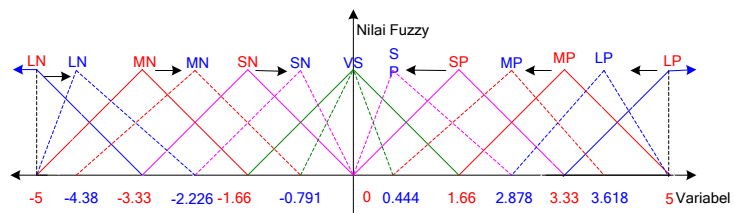
Gambar 2.72 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ΔACE_2

LN(Large Negative)	= [	-2	-1.376	-0.753]
MN(Medium Negative)	= [	-1.376	-0.753	-0.282]
SN(Small Negative)	= [	-0.753	-0.282	0]
VS(Very Small)	= [	-0.282	0	0.262]
SP(Small Positive)	= [	0	0.262	1.149]
MP(Medium Positive)	= [	0.262	1.149	1.708]
LP(Large Positive)	= [	1.149	1.708	2]



Gambar 2.73 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{12}

LN(Large Negative)	= [	-5	-4.38	-2.226]
MN(Medium Negative)	= [	-4.38	-2.226	-0.791]
SN(Small Negative)	= [	-2.226	-0.791	0]
VS(Very Small)	= [	-0.791	0	0.444]
SP(Small Positive)	= [	0	0.444	2.878]
MP(Medium Positive)	= [	0.444	2.878	3.618]
LP(Large Positive)	= [	2.878	3.618	5]



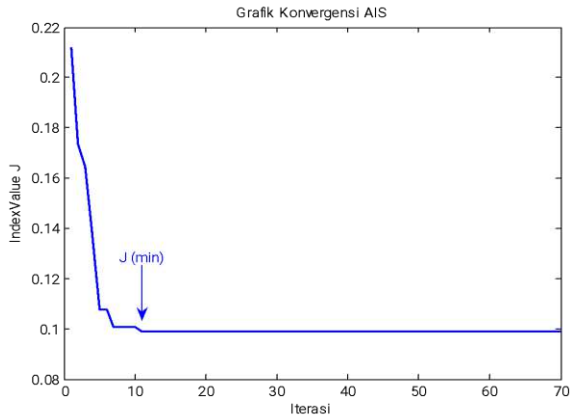
Gambar 2.74 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{p2}

Matriks pembobot Q dan R optimal adalah sebagai berikut,

$$Q = [16.3983 \ 72.8375 \ 0 \ 70 \ 14.8814 \ 16.0156 \ 26.3518 \ 22.6397 \ 0]$$

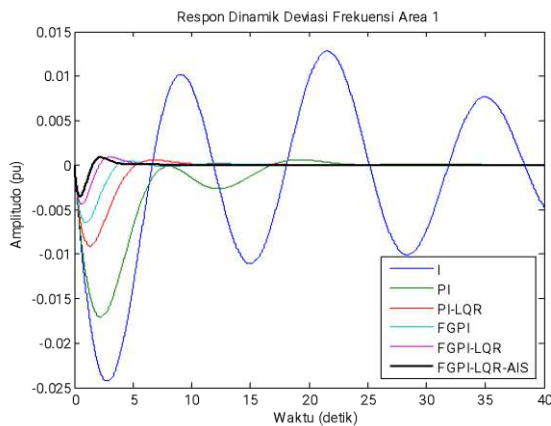
$$R = [1 \ 1]$$

Kurva konvergensi AIS dalam menala parameter matriks pembobot Q dan R kontrol optimal LQR dan *Fuzzy Logic* ditunjukkan pada di bawah ini, di mana J minimum dicapai pada generasi ke-11.

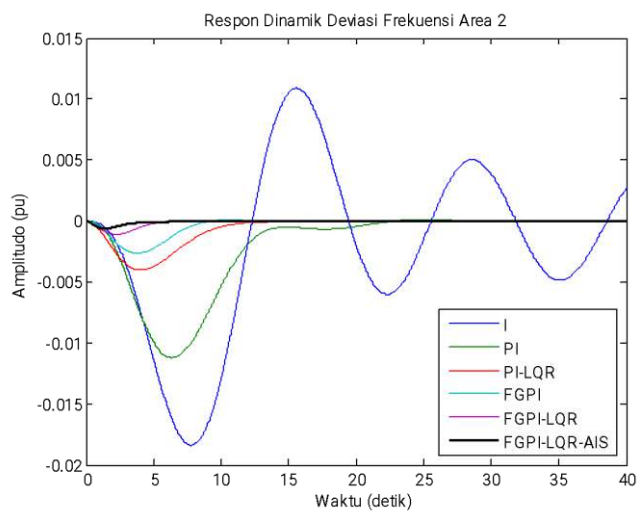


Gambar 2.75 Konvergensi AIS

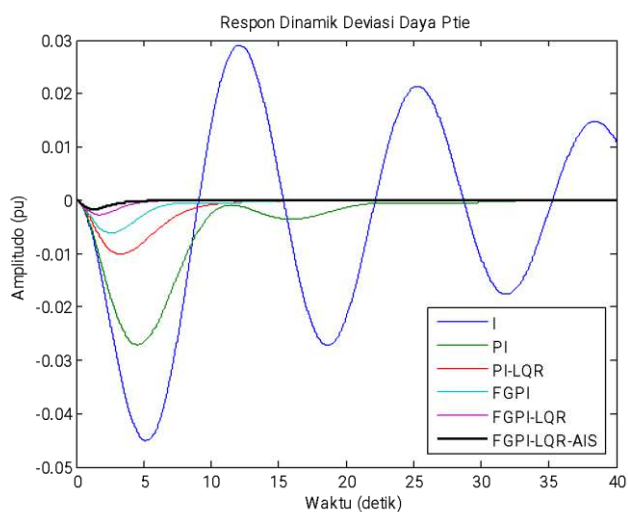
Respons *output* performansi deviasi frekuensi area 1, area 2, dan daya *tie-line* pada studi kasus 1 ini ditunjukkan pada gambar-gambar di bawah ini.



Gambar 2.76 Deviasi Frekuensi Area 1



Gambar 2.77 Deviasi Frekuensi Area 2



Gambar 2.78 Deviasi Daya *Tie-Line*

Perbandingan respons dinamik sistem dari tiga gambar di atas dapat dilihat pada dua tabel berikut ini.

Tabel 2.13 Data *Overshoot* Gambar 4.39 sampai Gambar 4.41 dalam p.u

	Kontroler Integral	Kontroler PI	PI-LQR	FGPI
Δf_1	-0.02423	-0.01705	-0.009098	-0.006281
Δf_2	-0.01837	-0.01119	-0.004014	-0.002652
ΔP_{tie}	-0.04487	-0.02704	-0.01011	-0.006128
	FGPI-LQR	FGPI-LQR ditala menggunakan AIS		
Δf_1	-0.004369	-0.003465		
Δf_2	-0.00106	-0.0006066		
ΔP_{tie}	-0.002765	-0.001627		

Tabel 2.14 Data *Settling Time* Gambar 4.39 sampai Gambar 4.41 dalam detik

	Kontroler Integral	Kontroler PI	PI-LQR	FGPI
Δf_1	169.6	33.06	17.66	17.3
Δf_2	172.6	28.24	17.56	16
ΔP_{tie}	185.2	33.93	21.73	20.78
	FGPI-LQR	FGPI-LQR ditala menggunakan AIS		
Δf_1	11.46	8.64		
Δf_2	13.43	10.36		
ΔP_{tie}	12.22	10.91		

Dari dua tabel di atas kita ketahui bahwa metode kontrol yang diusulkan dapat menekan osilasi deviasi frekuensi area 1, area 2, dan deviasi daya *tie-line* (jaring) sistem dan memperbaiki respons dinamik sistem.

Studi Kasus 3

Pada studi kasus 3, parameter sistem diasumsikan diberi perubahan sebesar +5% dan gangguan dengan perubahan permintaan beban yang meningkat di area satu sebesar 100 MW atau 0.05 p.u. Data parameter sistem dan parameter kontroler PI dapat dilihat pada dua tabel di bawah ini.

Tabel 2.15 Parameter Sistem

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
M_1	6,3 detik	T_{st1}	0,3675 detik
M_2	8,4 detik	T_{st2}	0,42 detik
R_1	2,52 Hz/p.u	T_{sg1}	0,0420 detik
R_2	3,36 Hz/p.u	T_{sg2}	0,5250 detik
B_1	$(1/R_1)+D_1$ p.u/Hz	B_2	$(1/R_1)+D_1$ p.u/Hz
T	0,6510 p.u		

Tabel 2.16 Nilai Parameter Kontroler PI

Parameter	Nilai
K_{I1}	0,3
K_{I2}	0.25
K_{P1}	0,8
K_{P2}	0,9

Tanpa Kontroler:

Perubahan beban area 1 sebesar: 100 MW

Base: 2000 MVA

Perubahan beban area 1 dalam satuan p.u:

$$\Delta P_{L1} = \frac{100}{2000} = 0.05 \text{ pu}$$

Deviasi frekuensi *steady-state* dalam satuan p.u:

$$\begin{aligned} \Delta\omega_{ss} &= \frac{-\Delta P_{L1}}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \\ &= \frac{-0.05}{\left(\frac{1}{2.52} + 1.5750\right) + \left(\frac{1}{3.36} + 2.1\right)} \\ &= -0.01144310235 \text{ pu} \end{aligned}$$

Deviasi frekuensi *steady-state* dalam satuan Hz:

$$\Delta f = (-0.01144310235) \times 50 = -0.5721551176 \text{ Hz}$$

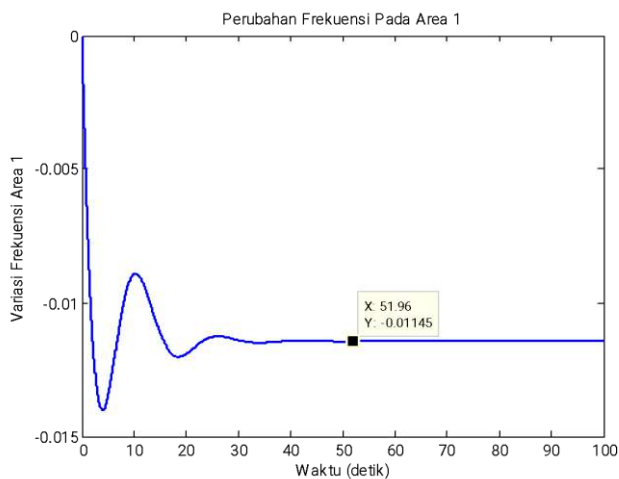
Frekuensi yang baru:

$$f = f_0 + \Delta f = 50 - 0.5721551176 = 49.42784488 \text{ Hz}$$

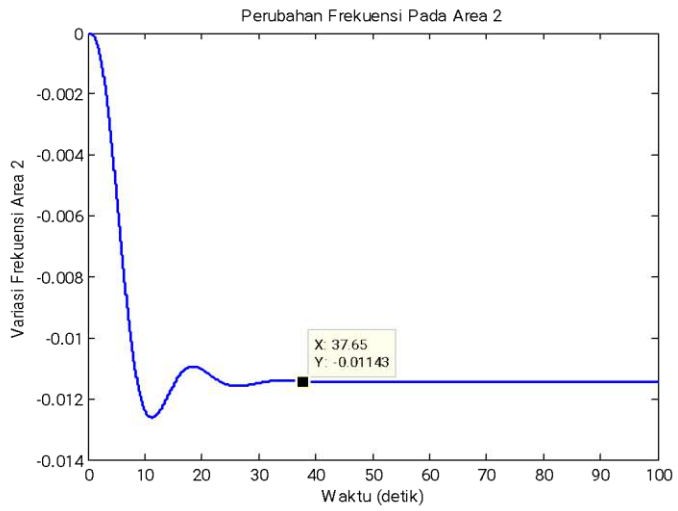
Perubahan daya jaring:

$$\begin{aligned} \Delta P_{12} &= \Delta \omega \left(\frac{1}{R_2} + D_2 \right) = (-0.01144310235) \times 2.397619048 \\ &= 0.02743620016 \text{ pu} = 54.87240032 \text{ MW} \end{aligned}$$

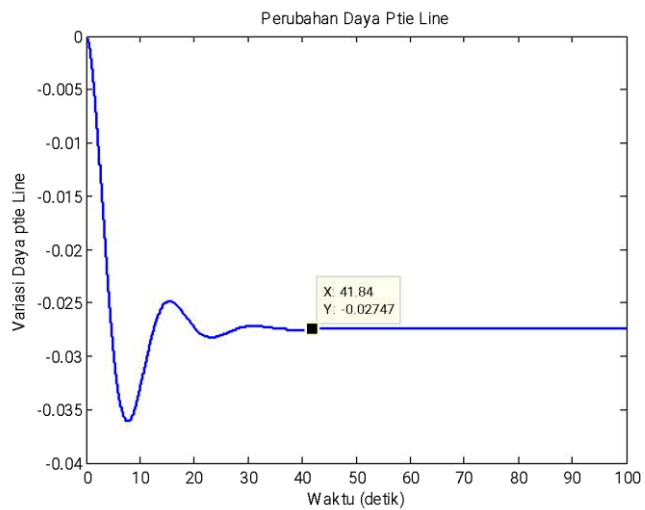
Hasil analisis studi kasus di atas dapat dilihat pada dua gambar di bawah ini. Di sini kita melihat, bahwa setelah sistem diberi gangguan berupa perubahan kenaikan beban pada area 1 akan mengakibatkan perubahan frekuensi sistem pada area 1 dan area 2 sebesar 0.01144310235 p.u atau mengalami penurunan frekuensi sebesar 0.5721551176 Hz pada area 1 dan area 2. Setelah terjadi perubahan beban pada area 1, sistem berada pada frekuensi *steady-state* yang baru yaitu 49.42784488Hz. Gambar ketiga di bawah ini menunjukkan, bahwa setelah terjadi perubahan beban di area 1, maka akan terjadi perubahan daya *tie-line* sebesar 0.02743620016 p.u atau sebesar 54.87240032 MW.



Gambar 2.79 Deviasi Frekuensi Area 1



Gambar 2.80 Deviasi Frekuensi Area 2



Gambar 2.81 Deviasi Daya *Tie-Line*

Menggunakan Kontroler:

Parameter AIS yang digunakan dapat dilihat pada data tabel di bawah ini. Klon diterapkan pada 100 antibodi dengan jumlah klon tiap antibodi

sebesar 10 antibodi. Mutasi diberikan pada 100 antibodi dengan *affinity* yang berbeda. Semakin bagus nilai *affinity* maka nilai peluang yang diberikan akan semakin kecil.

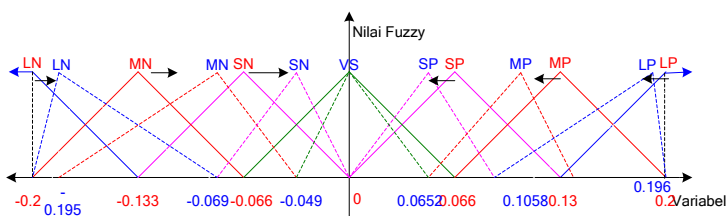
Tabel 2.17 Parameter AIS

No	Parameter	Nilai
1	Jumlah Iterasi	70
2	Jumlah Antibodi	100
3	Jumlah Gen	67
4	Jumlah Klon	10 / Ab
5	Peluang Mutasi	[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]

Hasil penalaan parameter fungsi keanggotaan *fuzzy* sistem pada area 1 sistem tenaga listrik,

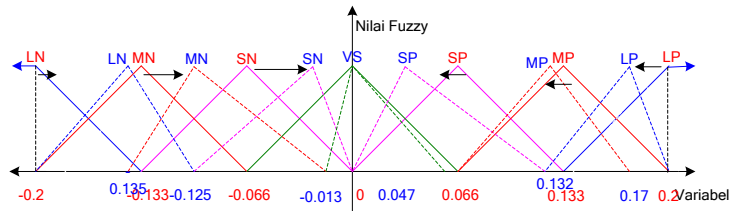
Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_1 , ΔACE_1 , K_{1L} , dan K_{P1} dibagi dalam tujuh triangular *fuzzy* fungsi keanggotaan (*Membership Function*) sebagai berikut.

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.195	-0.069]
MN(Medium Negative)	= [	-0.195	-0.069	-0.049]
SN(Small Negative)	= [	-0.069	-0.049	0]
VS(Very Small)	= [	-0.049	0	0.0652]
SP(Small Positive)	= [	0	0.0652	0.1058]
MP(Medium Positive)	= [	0.0652	0.1058	0.196]
LP(Large Positive)	= [	0.1058	0.196	0.2]



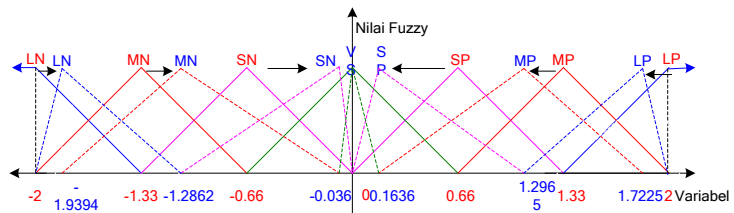
Gambar 2.82 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_1

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.135	-0.125]
MN(Medium Negative)	= [	-0.135	-0.125	-0.013]
SN(Small Negative)	= [	-0.125	-0.013	0]
VS(Very Small)	= [	-0.013	0	0.047]
SP(Small Positive)	= [	0	0.047	0.132]
MP(Medium Positive)	= [	0.047	0.132	0.17]
LP(Large Positive)	= [	0.132	0.17	0.2]



Gambar 2.83 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ΔACE_1

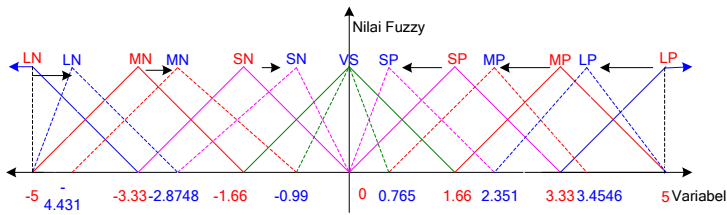
LN(Large Negative)	= [	-2	-1.9394	-1.2862]
MN(Medium Negative)	= [	-1.9394	-1.2862	-0.036]
SN(Small Negative)	= [	-1.2862	-0.036	0]
VS(Very Small)	= [	-0.036	0	0.1636]
SP(Small Positive)	= [	0	0.1636	1.2965]
MP(Medium Positive)	= [	0.1636	1.2965	1.7225]
LP(Large Positive)	= [	1.2965	1.7225	2]



Gambar 2.84 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{11}

LN(Large Negative)	= [	-5	-4.431	-2.8748]
MN(Medium Negative)	= [	-4.431	-2.8748	-0.99]
SN(Small Negative)	= [	-2.8748	-0.99	0]
VS(Very Small)	= [	-0.99	0	0.765]

SP(Small Positive)	= [	0	0.765	2.351]
MP(Medium Positive)	= [	0.765	2.351	3.4546]
LP(Large Positive)	= [	2.351	3.4546	5]

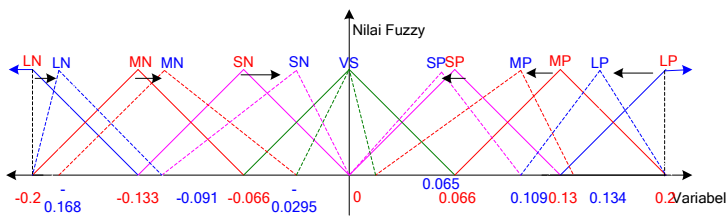


Gambar 2.85 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{p1}

Hasil penalaan parameter fungsi keanggotaan *fuzzy* sistem pada area 2 sistem tenaga listrik,

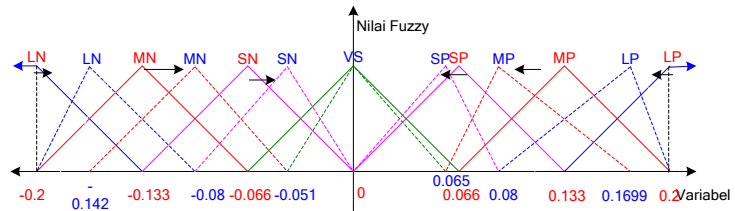
Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_2 , ΔACE_2 , K_{i2} , dan K_{p2} dibagi dalam tujuh triangular *fuzzy* fungsi keanggotaan (*Membership Function*) sebagai berikut.

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.168	-0.091]
MN(Medium Negative)	= [	-0.168	-0.091	-0.0295]
SN(Small Negative)	= [	-0.091	-0.0295	0]
VS(Very Small)	= [	-0.0295	0	0.065]
SP(Small Positive)	= [	0	0.065	0.109]
MP(Medium Positive)	= [	0.065	0.109	0.134]
LP(Large Positive)	= [	0.109	0.134	0.2]



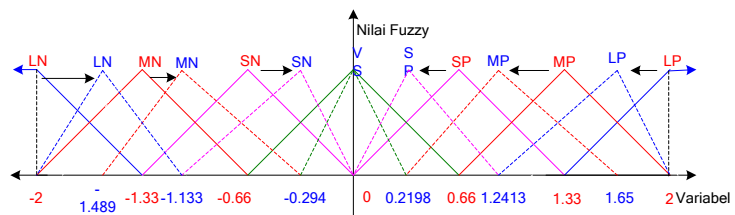
Gambar 2.86 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_2

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.142	-0.08]
MN(Medium Negative)	= [	-0.142	-0.08	-0.051]
SN(Small Negative)	= [	-0.08	-0.051	0]
VS(Very Small)	= [	-0.051	0	0.065]
SP(Small Positive)	= [	0	0.065	0.08]
MP(Medium Positive)	= [	0.065	0.08	0.1699]
LP(Large Positive)	= [	0.08	0.1699	0.2]



Gambar 2.87 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ΔACE_2

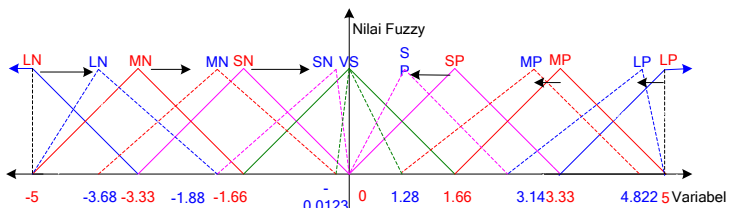
LN(Large Negative)	= [	-2	-1.489	-1.133]
MN(Medium Negative)	= [	-1.489	-1.133	-0.294]
SN(Small Negative)	= [	-1.133	-0.294	0]
VS(Very Small)	= [	-0.294	0	0.2198]
SP(Small Positive)	= [	0	0.2198	1.2413]
MP(Medium Positive)	= [	0.2198	1.2413	1.65]
LP(Large Positive)	= [	1.2413	1.65	2]



Gambar 2.88 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{12}

LN(Large Negative)	= [	-5	-3.68	-1.88]
MN(Medium Negative)	= [	-3.68	-1.88	-0.0123]
SN(Small Negative)	= [	-1.88	-0.0123	0]
VS(Very Small)	= [	-0.0123	0	1.28]

SP(Small Positive) = [0 1.28 3.14]
 MP(Medium Positive) = [1.28 3.14 4.822]
 LP(Large Positive) = [3.14 4.822 5]



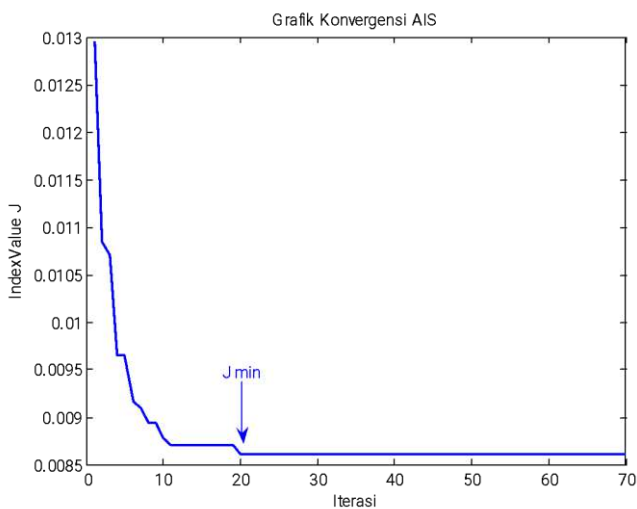
Gambar 2.89 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{p2}

Matriks pembobot Q dan R optimal adalah sebagai berikut,

$$Q = [32.651 \ 57.0921 \ 0 \ 90 \ 35.1046 \ 16.6569 \ 26.8294 \ 74.5596 \ 0]$$

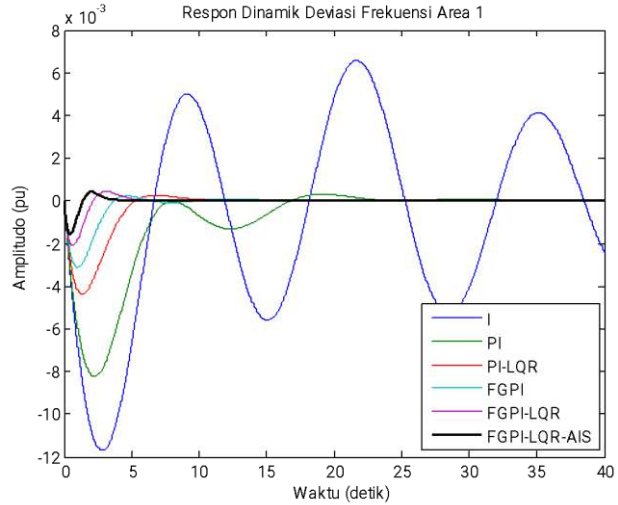
$$R = [1 \ 1]$$

Kurva konvergensi AIS dalam menala parameter matriks pembobot Q dan R kontrol optimal LQR dan *Fuzzy Logic* ditunjukkan pada gambar di bawah ini, di mana J minimum dicapai pada generasi ke-20.

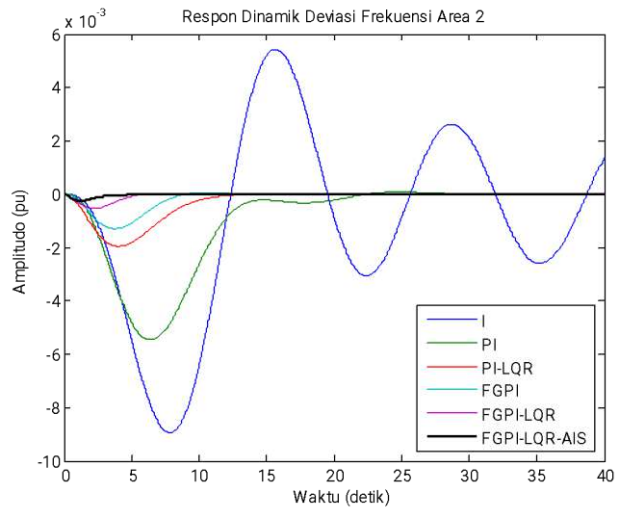


Gambar 2.90 Konvergensi AIS

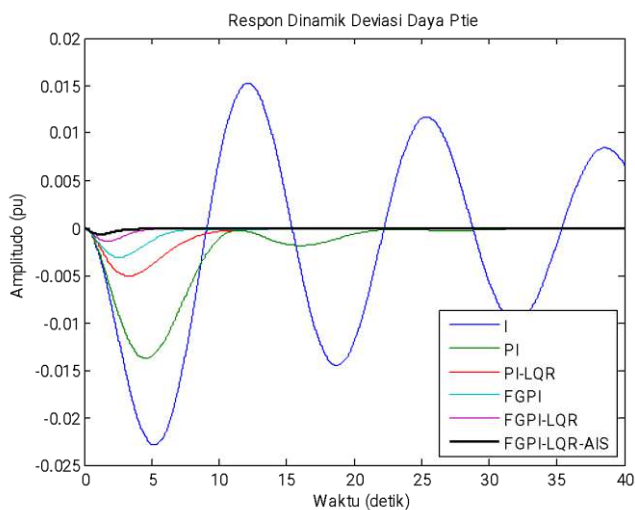
Respons *output* performansi deviasi frekuensi area 1, area 2, dan daya *tie-line* pada studi kasus 1 ini ditunjukkan tiga gambar di bawah ini.



Gambar 2.91 Deviasi Frekuensi Area 1



Gambar 2.92 Deviasi Frekuensi Area 2



Gambar 2.93 Deviasi Daya *Tie-Line*

Perbandingan respons dinamik sistem dari tiga gambar di atas dapat dilihat pada dua tabel di bawah ini.

Tabel 2.18 Data *Overshoot* Gambar 4.54 sampai Gambar 4.56 dalam p.u

	Kontroler Integral	Kontroler PI	PI-LQR	FGPI
Δf_1	-0.0117	-0.008229	-0.004363	-0.003112
Δf_2	-0.008941	-0.00545	-0.001955	-0.001302
ΔP_{tie}	-0.02289	-0.01373	-0.005045	-0.003108
	FGPI-LQR	FGPI-LQR ditala menggunakan AIS		
Δf_1	-0.002111	-0.001774		
Δf_2	-0.000542	-0.0003878		
ΔP_{tie}	-0.001401	-0.0009078		

Tabel 2.19 Data *Settling Time* Gambar 4.54 sampai Gambar 4.56 dalam detik

	Kontroler Integral	Kontroler PI	PI-LQR	FGPI
Δf_1	207.7	32.67	17.10	16.70
Δf_2	200.8	31.96	15.79	15.04
ΔP_{tie}	211.1	32.77	18.16	17.81
	FGPI-LQR	FGPI-LQR ditata menggunakan AIS		
Δf_1	10.96	8.54		
Δf_2	13.43	10.90		
ΔP_{tie}	11.26	9.25		

Data dari dua tabel di atas menunjukkan, bahwa metode kontrol yang diusulkan dapat menekan osilasi deviasi frekuensi area 1, area 2, dan deviasi daya *tie-line* (jaring) sistem dan memperbaiki respons dinamik sistem.

Studi Kasus 4

Pada studi kasus 4, parameter sistem diasumsikan diberi perubahan sebesar -5% dan juga gangguan dengan perubahan permintaan beban yang meningkat di area satu sebesar 100 MW atau 0.05 p.u. Parameter sistem dan parameter kontroler PI dapat dilihat sebagai berikut.

Tabel 2.20 Parameter Sistem

Parameter	Nilai	Parameter	Nilai
M_1	5,7 detik	T_{CH1}	0,3325 detik
M_2	7,6 detik	T_{CH2}	0,3800 detik
R_1	2,28 Hz/p.u	T_{g1}	0,0380 detik
R_2	3,04 Hz/p.u	T_{g2}	0,4750 detik
B_1	$(1/R_1)+D_1$ p.u/Hz	B_2	$(1/R_1)+D_1$ p.u/Hz
T	0,5890 p.u		

Tabel 2.21 Nilai Parameter Kontroler PI

Parameter	Nilai
K_{I1}	0,3
K_{I2}	0.25
K_{P1}	0,8
K_{P2}	0,9

Tanpa Kontroler:

Perubahan beban area 1 sebesar: 100 MW

Base: 2000 MVA

Perubahan beban area 1 dalam satuan p.u:

$$\Delta P_{L1} = \frac{100}{2000} = 0.05 \text{ pu}$$

Deviasi frekuensi *steady-state* dalam satuan p.u:

$$\begin{aligned}\Delta\omega_{ss} &= \frac{-\Delta P_{L1}}{\left(\frac{1}{R_1} + D_1\right) + \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right)} \\ &= \frac{-0.05}{\left(\frac{1}{2.28} + 1.42\right) + \left(\frac{1}{3.04} + 1.9\right)} \\ &= -0.01223228465 \text{ pu}\end{aligned}$$

Deviasi frekuensi *steady-state* dalam satuan Hz:

$$\Delta f = (-0.01223228465) \times 50 = -0.6116142324 \text{ Hz}$$

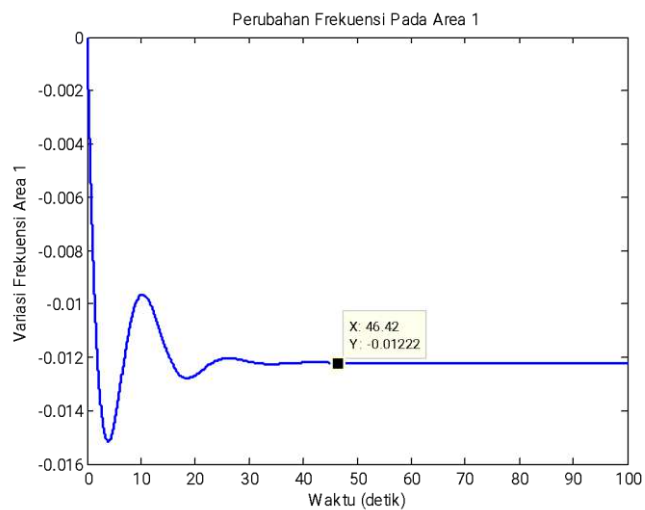
Frekuensi yang baru:

$$f = f_0 + \Delta f = 50 - 0.6116142324 = 49.38838577 \text{ Hz}$$

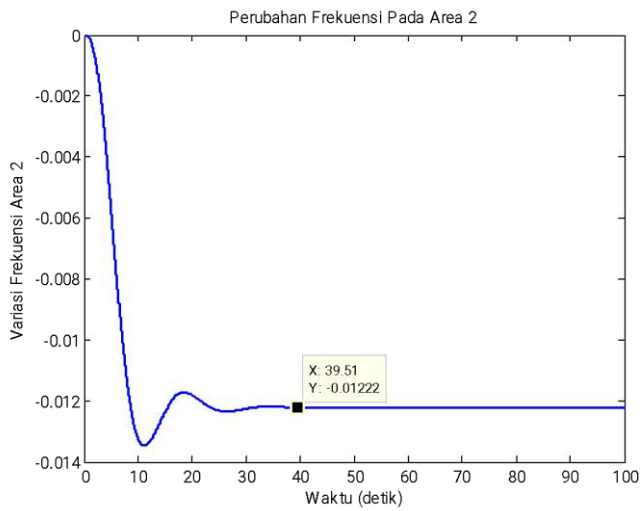
Perubahan daya jaring:

$$\begin{aligned}\Delta P_{12} &= \Delta\omega \left(\frac{1}{R_2} + D_2\right) = (-0.01223228465) \times 2.228947368 \\ &= 0.02726511868 \text{ pu} = 54.53023736 \text{ MW}\end{aligned}$$

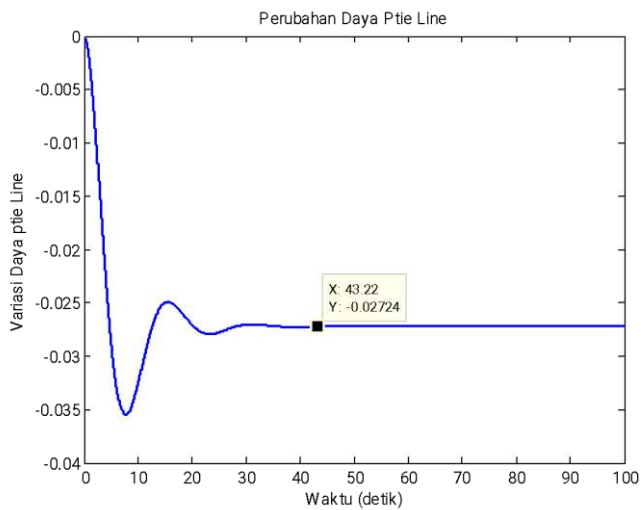
Hasil analisis di atas dapat dilihat pada tiga gambar di bawah ini. Dalam hal ini kita melihat, bahwa setelah sistem diberi gangguan berupa perubahan kenaikan beban pada area 1, perubahan frekuensi sistem pada area 1 dan area 2 sebesar 0.0122322846 p.u atau mengalami penurunan frekuensi sebesar 0.611642324 Hz pada area 1 dan area 2. Setelah terjadi perubahan beban pada area 1, sistem berada pada frekuensi *steady-state* yang baru yaitu 49.38838577 Hz. Artinya, perubahan beban di area 1 sejalan dengan perubahan daya *tie-line* sebesar 0.0276511868 p.u atau sebesar 54.53023736 MW.



Gambar 2.94 Deviasi Frekuensi Area 1



Gambar 2.95 Deviasi Frekuensi Area 2



Gambar 2.96 Deviasi Daya *Tie-Line*

Menggunakan Kontroler:

Parameter AIS yang digunakan ditunjukkan pada tabel berikut. Klon diterapkan pada 50 antibodi dengan jumlah klon tiap antibodi sebesar 10

antibodi. Mutasi diberikan kepada 50 antibodi dengan *affinity* yang berbeda. Semakin bagus nilai *affinity* maka nilai peluang yang diberikan semakin kecil.

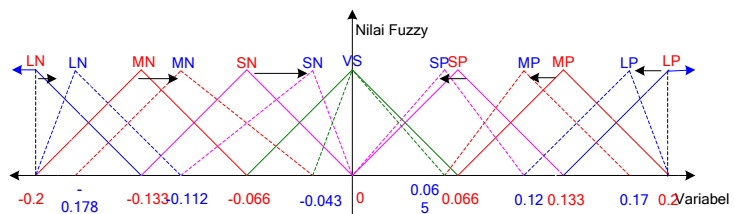
Tabel 2.22 Parameter AIS

No	Parameter	Nilai
1	Jumlah Iterasi	70
2	Jumlah Antibodi	50
3	Jumlah Gen	67
4	Jumlah Klon	10 / Ab
5	Peluang Mutasi	[0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1]

Hasil penalaan parameter *Membership Function fuzzy* sistem pada area 1 sistem tenaga listrik,

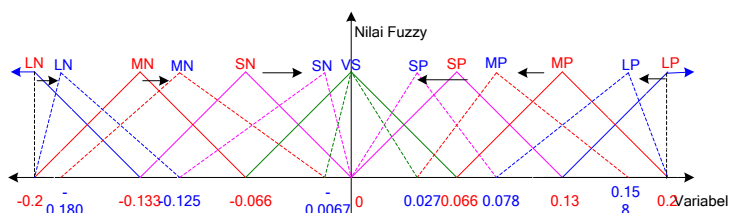
Fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_1 , ΔACE_1 , K_{1L} , dan K_{p1} dibagi dalam tujuh triangular *fuzzy* fungsi keanggotaan (*Membership Function*) sebagai berikut.

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.178	-0.112]
MN(Medium Negative)	= [	-0.178	-0.112	-0.043]
SN(Small Negative)	= [	-0.112	-0.043	0]
VS(Very Small)	= [	-0.043	0	0.065]
SP(Small Positive)	= [	0	0.065	0.12]
MP(Medium Positive)	= [	0.065	0.12	0.17]
LP(Large Positive)	= [	0.12	0.17	0.2]



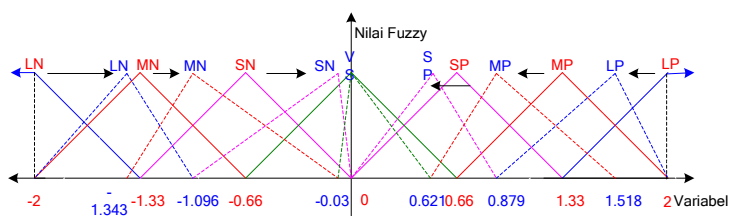
Gambar 2.97 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_1

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.180	-0.125]
MN(Medium Negative)	= [	-0.180	-0.125	-0.0067]
SN(Small Negative)	= [	-0.125	-0.0067	0]
VS(Very Small)	= [	-0.0067	0	0.027]
SP(Small Positive)	= [	0	0.027	0.078]
MP(Medium Positive)	= [	0.027	0.078	0.158]
LP(Large Positive)	= [	0.078	0.158	0.2]



Gambar 2.98 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ΔACE_1

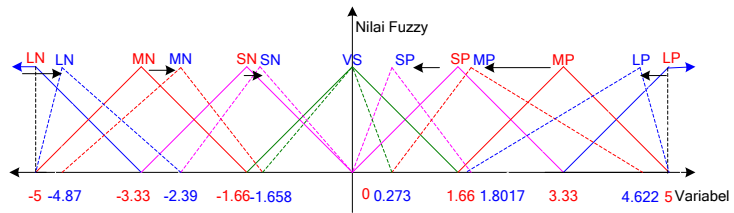
LN(Large Negative)	= [	-2	-1.343	-1.096]
MN(Medium Negative)	= [	-1.343	-1.096	-0.03]
SN(Small Negative)	= [	-1.096	-0.03	0]
VS(Very Small)	= [	-0.03	0	0.621]
SP(Small Positive)	= [	0	0.621	0.879]
MP(Medium Positive)	= [	0.621	0.879	1.518]
LP(Large Positive)	= [	0.879	1.518	2]



Gambar 2.99 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_1

LN(Large Negative)	= [	-5	-4.87	-2.39]
MN(Medium Negative)	= [	-4.87	-2.39	-1.658]
SN(Small Negative)	= [	-2.39	-1.658	0]
VS(Very Small)	= [	-1.658	0	0.273]

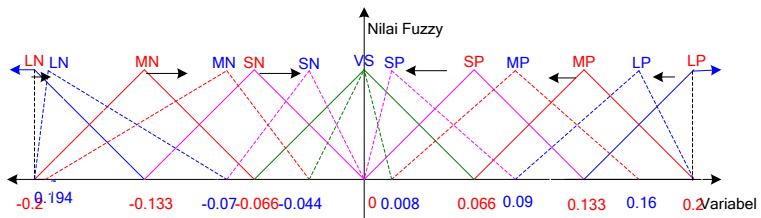
SP(Small Positive)	= [	0	0.273	1.8017]
MP(Medium Positive)	= [	0.273	1.8017	4.622]
LP(Large Positive)	= [	1.8017	4.622	5]



Gambar 2.100 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{p1}

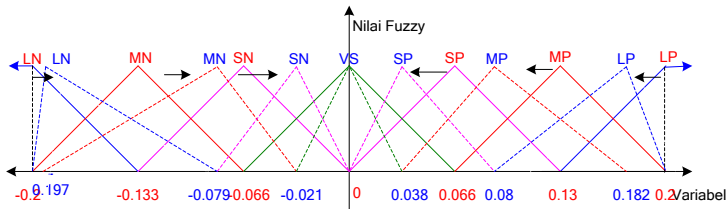
Hasil penalaan parameter *Membership Function fuzzy* sistem pada area 2 sistem tenaga listrik menunjukkan, bahwa fungsi keanggotaan (*Membership Function*) variabel input ACE_2 , ΔACE_2 , K_{I2} , dan K_{p2} dibagi dalam tujuh triangular *fuzzy* fungsi keanggotaan (*Membership Function*) sebagai berikut.

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.193	-0.1]
MN(Medium Negative)	= [	-0.193	-0.1	-0.071]
SN(Small Negative)	= [	-0.1	-0.071	0]
VS(Very Small)	= [	-0.071	0	0.003]
SP(Small Positive)	= [	0	0.003	0.12]
MP(Medium Positive)	= [	0.003	0.12	0.193]
LP(Large Positive)	= [	0.12	0.193	0.2]



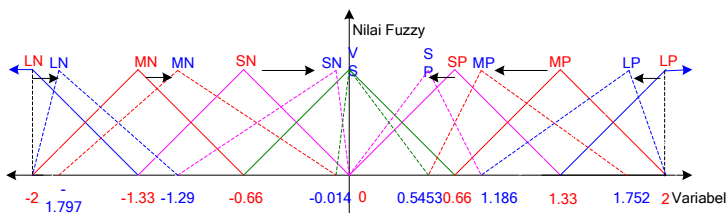
Gambar 2.101 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ACE_2

LN(Large Negative)	= [	-0.2	-0.184	-0.074]
MN(Medium Negative)	= [	-0.184	-0.074	-0.037]
SN(Small Negative)	= [	-0.074	-0.037	0]
VS(Very Small)	= [	-0.037	0	0.0098]
SP(Small Positive)	= [	0	0.0098	0.078]
MP(Medium Positive)	= [	0.0098	0.078	0.199]
LP(Large Positive)	= [	0.078	0.199	0.2]



Gambar 2.102 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Input ΔACE_2

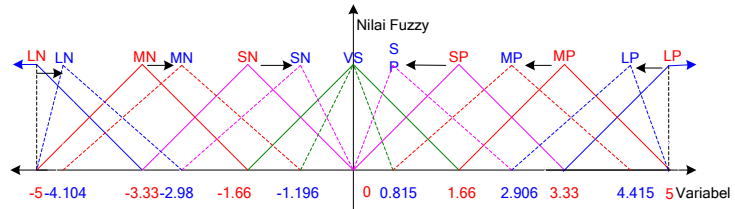
LN(Large Negative)	= [	-2	-1.797	-1.29]
MN(Medium Negative)	= [	-1.797	-1.29	-0.014]
SN(Small Negative)	= [	-1.29	-0.014	0]
VS(Very Small)	= [	-0.014	0	0.5453]
SP(Small Positive)	= [	0	0.5453	1.186]
MP(Medium Positive)	= [	0.5453	1.186	1.752]
LP(Large Positive)	= [	1.186	1.752	2]



Gambar 2.103 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{12}

LN(Large Negative)	= [	-5	-4.104	-2.98]
MN(Medium Negative)	= [	-4.104	-2.98	-1.196]
SN(Small Negative)	= [	-2.98	-1.196	0]
VS(Very Small)	= [	-1.196	0	0.815]

SP(Small Positive)	= [	0	0.815	2.906]
MP(Medium Positive)	= [	0.815	2.906	4.415]
LP(Large Positive)	= [	2.906	4.415	5]



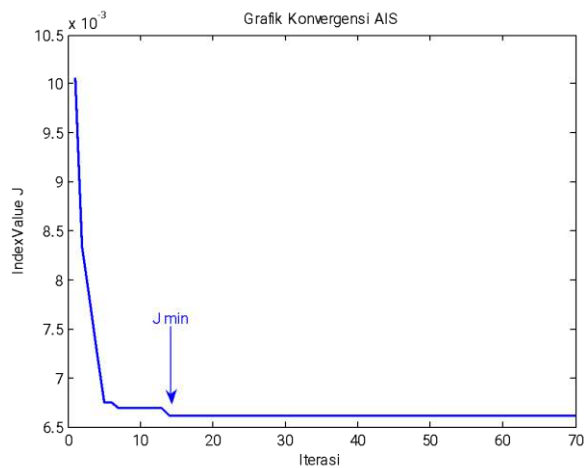
Gambar 2.104 Fungsi Keanggotaan (*Membership Function*) Variable Output K_{p2}

Matriks pembobot Q dan R optimal adalah sebagai berikut,

$$Q = [11.044 \ 52.438 \ 0 \ 0 \ 10.2899 \ 15.503 \ 98.03526.051 \ 90]$$

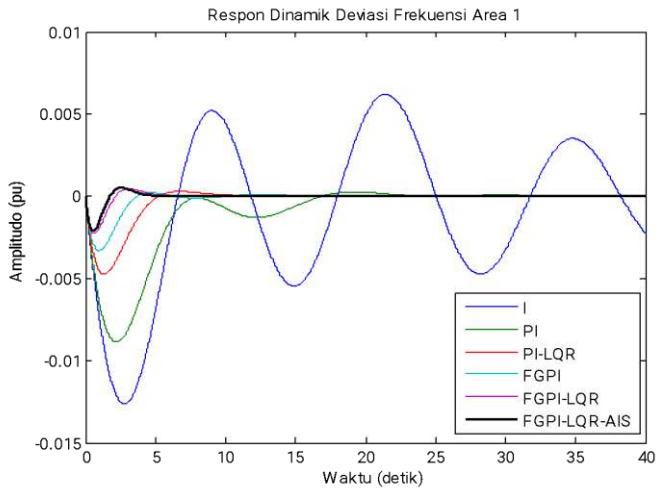
$$R = [1 \ 1]$$

Kurva konvergensi AIS dalam menala parameter matriks pembobot Q dan R kontrol optimal LQR dan *Fuzzy Logic* pada studi kasus 4 dapat dilihat pada gambar di bawah ini, di mana J minimum dicapai pada generasi ke-14.

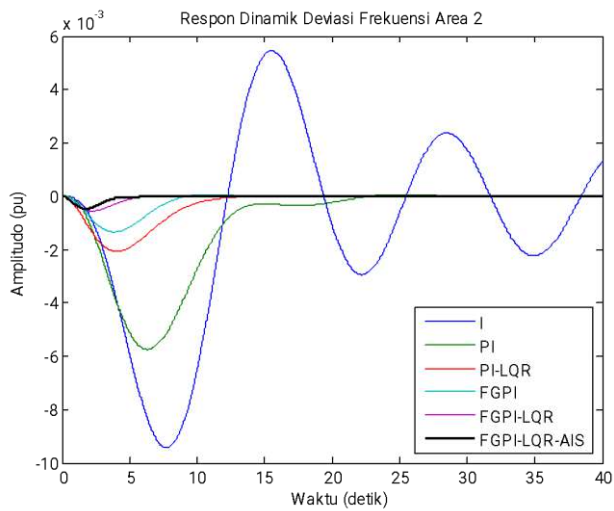


Gambar 2.105 Konvergensi AIS

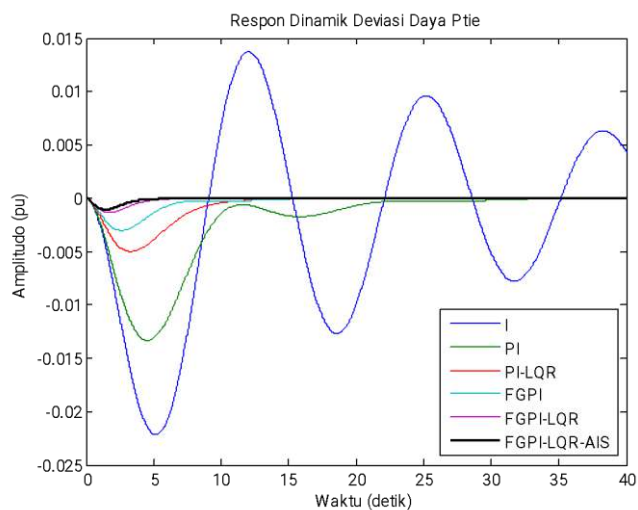
Respons *output* performansi deviasi frekuensi area 1, area 2, dan daya *tie-line* pada studi kasus 1, ditunjukkan pada tiga gambar di bawah ini.



Gambar 2.106 Deviasi Frekuensi Area 1



Gambar 2.107 Deviasi Frekuensi Area 2



Gambar 2.108 Deviasi Daya *Tie-Line*

Perbandingan respons dinamik sistem dari tiga gambar di atas dapat dilihat pada dua tabel di bawah ini.

Tabel 2.23 Data *Overshoot* Gambar 4.69 sampai Gambar 4.71 dalam p.u.

	Kontroler Integral	Kontroler PI	PI-LQR	FGPI
Δf_1	-0.01262	-0.008848	-0.004685	-0.003326
Δf_2	-0.009419	-0.005729	-0.002062	-0.001347
ΔP_{tie}	-0.02217	-0.01333	-0.005008	-0.00302
	FGPI-LQR	FGPI-LQR ditala menggunakan AIS		
Δf_1	-0.002105		-0.002045	
Δf_2	-0.0005464		-0.0004707	
ΔP_{tie}	-0.00136		-0.001039	

Tabel 2.24 Data *Settling Time* Gambar 4.69 sampai 4.71 dalam detik

	Kontroler Integral	Kontroler PI	PI-LQR	FGPI
Δf_1	151.9	33.21	17.56	16.90
Δf_2	158.8	31.81	16.95	16.03
ΔP_{tie}	170.3	32.02	17.46	17.36
	FGPI-LQR	FGPI-LQR ditala menggunakan AIS		
Δf_1	11.71	8.14		
Δf_2	14.05	10.09		
ΔP_{tie}	12.57	9.25		

Data dari dua tabel di atas menunjukkan, bahwa metode kontrol yang diusulkan dapat menekan osilasi deviasi frekuensi area 1, area 2, dan deviasi daya *tie-line* (jaring) sistem dan memperbaiki respons dinamik sistem.

Intisari

Pada intinya, setelah melakukan simulasi dan analisis terkait aplikasi *Artificial Immune System (AIS)* via *Clonal Selection*, kita berhasil mentala matriks pembobot Q dan R kontrol optimal LQR dan parameter *Fuzzy Logic Tuning kontroler PI* yang diaplikasikan pada *Load Frequency Control* sistem tenaga listrik. Berikut beberapa informasi yang berhasil dihimpun. Pertama, metode *Artificial Immune System (AIS)* via *Clonal Selection* dapat diaplikasikan dengan baik untuk parameter optimal matriks pembobot Q dan R kontrol optimal *Linear Quadratic Regulator (LQR)* dan parameter *Fuzzy Logic Tuning kontroler PI*. Selain itu, aplikasi metode AIS dapat menekan/memperbaiki *overshoot* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line*, antara lain sebagai berikut.

- a) Pada studi kasus 1, AIS dapat menekan *overshoot* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line* secara berturut-turut dari -0.002191 p.u, -0.000523 p.u, -0.001383 p.u menjadi -0.00181 p.u, -0.0004459 p.u, -0.0009332 p.u.
- b) Pada studi kasus 2, AIS dapat memperbaiki *overshoot* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line* secara

berturut-turut dari -0.004369 p.u, -0.00106 p.u, -0.002765 p.u menjadi -0.003465 p.u, -0.0006066 p.u, -0.001627 p.u.

- c) Pada kasus 3, AIS dapat memperbaiki *overshoot* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line* secara berturut-turut dari -0.002111 p.u, -0.000542 p.u, -0.001401 p.u menjadi -0.001774 p.u, -0.0003878 p.u, -0.0009078 p.u.
- d) Pada kasus 4, AIS dapat memperbaiki *overshoot* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line* secara berturut-turut dari -0.002105 p.u, -0.0005464 p.u, -0.00136 p.u menjadi -0.002045 p.u, -0.0004707 p.u, -0.001039 p.u.

Aplikasi metode AIS juga mampu mempercepat *settling time* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line*, sebagai berikut.

- a) Pada studi kasus 1, AIS dapat mempercepat *settling time* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line* secara berturut-turut dari 11.16 detik, 13.85 detik, 11.41 detik menjadi 8.36 detik, 9.48 detik, 10.39 detik.
- b) Pada studi kasus 2, AIS dapat mempercepat *settling time* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line* secara berturut-turut dari 11.46 detik, 13.43 detik, 12.22 detik menjadi 8.64 detik, 10.36 detik, 10.91 detik.
- c) Pada studi kasus 3, AIS dapat mempercepat *settling time* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line* secara berturut-turut dari 10.96 detik, 13.43 detik, 12.26 detik menjadi 8.54 detik, 10.90 detik, 9.25 detik.
- d) Pada studi kasus 4, AIS dapat mempercepat *settling time* respons deviasi frekuensi area 1, frekuensi area 2, dan daya *tie-line* secara berturut-turut dari 11.71 detik, 14.05 detik, 12.57 detik menjadi 8.14 detik, 10.09 detik, 9.25 detik.

Tidak terlepas dari kekurangan yang ada di dalam pembahasan bab ini, penulis berharap agar dapat dilakukan riset dan pengembangan lebih lanjut tentang aplikasi *Artificial Immune System (AIS)* via *Clonal Selection*.

Terutama untuk mentala matriks pembobot Q dan R kontrol optimal LQR dan parameter *Fuzzy Logic Tuning kontroler PI* yang diaplikasikan pada *Load Frequency Control* sistem tenaga listrik. Misalnya dengan melakukan simulasi tidak terbatas pada penggunaan Software MATLAB M-File, tetapi juga SIMULINK agar lebih mudah dalam menganalisis gangguan akibat penambahan atau pengurangan beban melalui penambahan sinyal step. Selain itu, *Fuzzy Logic* dapat diubah menjadi *Interval Type 2 Fuzzy Logic*. Metode ini diaplikasikan pada *plant* yang lebih besar, misalnya analisis *Load Frequency Control* pada interkoneksi sistem tenaga listrik Jawa-Madura-Bali.

Bagian 3

Formulasi *Optimal Power Flow* dengan Konstrains Kestabilan Tegangan

Ir. Syukriyadin, ST, MT, IPM
syukriyadin@usk.ac.id ; ssyukriyadin@gmail.com

Pertumbuhan beban tenaga listrik dan keterbatasan penyaluran daya yang disertai dengan kebijakan deregulasi pada bidang tenaga listrik membuat kita memerlukan kontrol yang efektif untuk kualitas dan stabilitas tenaga listrik. Stabilitas tegangan sudah merupakan salah satu perhatian utama agar diperoleh penyelesaian yang efektif dan ekonomis. Misalnya kompensator *shunt* dan seri yang dapat digunakan untuk memperbaiki stabilitas tegangan.

Dewasa ini, kendali tenaga listrik sudah menjadi intelijen dengan pemanfaatan perkembangan teknologi elektronika daya. Kombinasi teknologi elektronika daya pada perlengkapan tenaga listrik melahirkan suatu konsep baru yang dikenal dengan *Flexible AC Transmission System* (FACTS). Penggunaan FACTS merupakan cara baru di bidang transmisi tenaga listrik yang mampu meningkatkan kemampuan transfer daya tenaga listrik tanpa perlu mendirikan konstruksi jaringan listrik yang baru. Fleksibilitas, efektivitas, dan keandalan FACTS memberikan keuntungan dalam operasi aliran daya dan kontrol.

Melalui keterpaduan kompensator seri dengan teknologi elektronika daya, lahir komponen FACTS dengan nilai kompensator yang lebih variabel. Kompensator ini dikenal dengan *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC). TCSC sudah diuji dan dipasang di beberapa negara, seperti Kayenta, Slatt, Brazil, India dan China. TCSC mampu meningkatkan kemampuan transfer daya, *damping power oscillation*, *damping subsynchronous resonances*, dan kontrol aliran daya.

Pengaturan sudut penyalan *thyristor* TCSC diharapkan dapat memberikan kompensasi kapasitif pada jaringan sehingga transfer aliran daya dapat dioptimalkan. Akan tetapi kestabilan tegangan bus patut diperhatikan terkait stabil tidaknya berada dalam konstrain aliran daya optimal tersebut. Studi *Optimal Power Flow* (OPF) sudah banyak dibahas di berbagai sumber, yang mana berperan sebagai kelanjutan aplikasi OPF untuk analisis kestabilan tegangan dalam konstrain aliran daya optimal yang digunakan mengevaluasi kestabilan tegangan bus.

Seperti yang diketahui, bahwa permasalahan aliran daya optimal sistem tenaga listrik dirumuskan dengan memasukkan konstrain tegangan yang melibatkan TCSC. Reaktansi TCSC digunakan dalam persamaan konstrain ketidaksamaan permasalahan aliran daya optimal sistem tenaga listrik. Reaktansi ini berperan dalam mengatur reaktansi jaringan yang memberikan efek peningkatan transfer daya. Artinya, batas aman pembebanan sistem dapat diperbesar.

Fungsi objektif untuk menyelesaikan masalah aliran daya optimal ini merupakan suatu fungsi berbentuk multi-objektif yang mengoptimalkan biaya suplai dan *demand*. Termasuk juga mengoptimalkan pembebanan sistem (*loading margin*) sehingga pada kondisi tersebut tegangan sistem berada dalam limit yang aman atau stabil. Dalam kesempatan ini, penulis berusaha memberikan informasi tentang bagaimana memaksimalkan *social benefit* dan pembebanan maksimum yang melibatkan TCSC dengan tetap menjaga kestabilan tegangan agar jauh dari titik bifurkasi sistem.

Sudah banyak dilakukan studi OPF dalam konstrain kestabilan tegangan yang melibatkan TCSC tanpa mempertimbangkan model konstrain *social benefit* dalam fungsi objektif. Sudah ada juga metode analisis *Optimal Power Flow* untuk kestabilan tegangan sistem tenaga listrik tanpa menggunakan TCSC dengan fungsi objektif berbentuk fungsi multi-objektif. Dari dua hal inilah penulis berusaha menggabungkannya dalam suatu fungsi multi-objektif menggunakan TCSC. Perlu dipahami bahwa di dalam pembahasan ini penulis menerapkan metode penyelesaian permasalahan OPF dilakukan dengan metode *Interior Point*

Method. Kondisi analisis OPF juga hanya dilakukan pada kondisi beban tertentu. Dan selain TCSC, penggunaan komponen *FACTS Device* yang lain tidak digunakan.

Persamaan Umum Aliran Daya

Persamaan yang relevan yang pang memungkinkan untuk digunakan ialah persamaan aliran daya, sebagai berikut [1]:

$$f(x, p) = f(V, \delta, P_G, Q_G, P_L, Q_L) = 0 \quad (2.1)$$

- a) $f : \mathfrak{R}^{n+m} \rightarrow \mathfrak{R}^{2N}$ merupakan suatu himpunan set persamaan nonlinier
- b) N menyatakan jumlah bus dalam jaring
- c) $x = (x \in \mathfrak{R}^n)$ adalah vektor dari variable yang tak bebas (*dependent variable*) d
- d) $p (p \in \mathfrak{R}^m)$ adalah vektor dari variabel bebas (*independent variable*) atau variabel kontrol.

Dalam standar formulasi *single slack* aliran daya, variabel bebas di sini ialah magnitude tegangan V dan sudut fasa δ pada *load bus*, sementara variabel kontrol adalah daya reaktif generator Q_G dan tegangan fasa pada generator bus, daya beban P_L, Q_L dan tegangan *slack* bus. Dalam perhitungan *Optimal Power Flow* (OPF), variabel tak bebas dan variabel kontrol disatukan dalam suatu vektor pada variabel yang ditetapkan (*decision variable*) sebagai berikut [1]:

$$y = (x, p) = (V, \delta, P_G, Q_G, P_L, Q_L) \quad (2.2)$$

Daya yang diinjeksikan dimodelkan sebagai selisih jumlah daya generator dan daya beban yang terhubung ke bus h , dengan persamaan sebagai berikut [1].

$$P_h = \sum_{i \in I_h} P_{Gi} - \sum_{j \in J_h} P_{Lj} \quad (2.3)$$

I_h dan J_h merupakan jumlah *sub-sets generator* dan beban yang dihubungkan ke bus h .

P_G dan P_L dibentuk seperti pada persamaan (2.6) dan (2.7) sebagai berikut [1].

$$P_G = P_{G0} + P_S \quad (2.4)$$

$$P_L = P_{L0} + P_D \quad (2.5)$$

Selama proses penyelesaian permasalahan berjalan, aliran daya sistem diasumsikan dalam kondisi seimbang (simetris) dan model *single-phase* digunakan. Tegangan magnitude $|V|$, sudut fasa δ , daya real P , dan daya reaktif Q diasosiasikan dengan masing-masing bus. Secara umum, sistem bus diklasifikasikan ke dalam tiga bagian [2] sebagai berikut:

1. Slack/Swing bus

Merupakan bus yang diambil sebagai referensi di mana magnitude dan sudut fasa tegangan bus diketahui. Bus ini bekerja secara berbeda antara penjadwalan pembebanan dan pembangkitan karena terdapat *losses* dalam jaring.

2. Regulated buses

Bus ini merupakan generator bus atau disebut *voltage-controlled busses*. Di dalam bus ini, daya real dan magnitude tegangan diketahui. Sudut fasa dan daya reaktif dihitung. Batasan kemampuan daya reaktif pada bus ini ditentukan, dan bus ini dikenal juga sebagai P-V bus.

3. Load Bus

Pada bus ini, daya aktif dan reaktif diketahui. Magnitude dan sudut fasa tegangan bus dihitung, dan bus ini dikenal dengan sebutan P-Q bus.

Analisis aliran daya suatu jaring sistem tenaga listrik secara normal dilakukan saat kondisi *steady state*. Asumsi kondisi sistem adalah seimbang dan direpresentasikan dalam jaring *single-phase*. Jaring terdiri dari sejumlah *nodes* dan *branches* dengan impedansi yang dispesifikasikan per unit dalam MVA base bersama.

Persamaan jaring dapat diformulasikan secara sistematis dengan bentuk yang bervariasi. Akan tetapi, metode tegangan node dinilai *suitable* digunakan untuk sejumlah analisis sistem tenaga. Formulasi persamaan jaring berupa nodal admittance menghasilkan persamaan aljabar kompleks linier simultan dalam bentuk arus node. Saat arus node dispesifikasikan, sejumlah persamaan linier dapat diselesaikan untuk tegangan node. Namun demikian, dalam sistem tenaga, daya (*power*) lebih diketahui besarnya dibandingkan arus. Artinya, persamaan dihasilkan dalam bentuk daya sehingga lebih dikenal dengan persamaan aliran daya nonlinier yang mana harus diselesaikan dengan cara iterasi.

Studi aliran daya juga dikenal dengan *load flow*, yakni suatu *tool* yang menjadi *backbone* analisis dan perencanaan sistem tenaga listrik. *Tool* ini dibutuhkan untuk perencanaan, pengoperasian, *economic scheduling* dan pertukaran daya antara utilitas. Bahkan analisis aliran daya juga bisa diterapkan untuk analisis kestabilan transien, analisis aliran daya optimal, analisis *continuation power flow* dan *analisis contingency*.

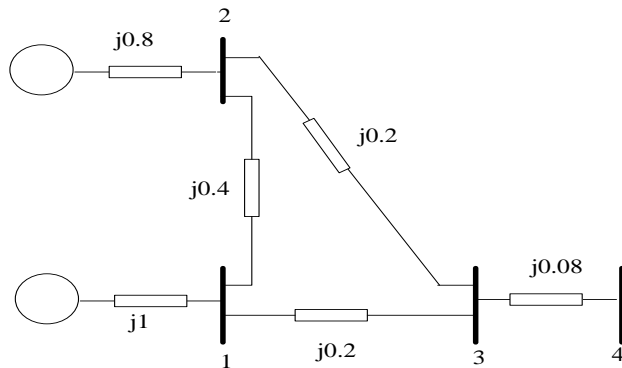
Matriks Admitansi Bus

Untuk membentuk persamaan node tegangan, impedansi jaring dinyatakan dalam per unit (p.u) dan MVA base bersama di mana resistansi diabaikan. Artinya, untuk impedansi yang konversikan ke dalam bentuk admitansi (persamaan 2.6), maka penyelesaian tegangan node dapat diselesaikan berdasarkan hukum KCL (*Kirchoff Current Law*) sebagai berikut.

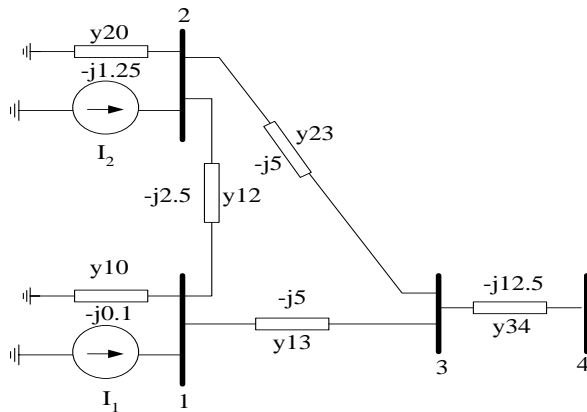
$$y_{ij} = \frac{1}{z_{ij}} = \frac{1}{r_{ij} + jx_{ij}} \quad (2.6)$$

Jaring digambarkan dalam bentuk admitansi dan transformasi arus sumber. Node 0 (normalnya adalah *ground*) diambil sebagai referensi. Dengan menerapkan KCL setiap bus, maka diperoleh persamaan arus sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned}
 I_1 &= y_{10}V_1 + y_{12}(V_1 - V_2) + y_{13}(V_1 - V_3) \\
 I_2 &= y_{20}V_2 + y_{12}(V_2 - V_1) + y_{23}(V_2 - V_3) \\
 0 &= y_{23}(V_3 - V_2) + y_{13}(V_3 - V_1) + y_{34}(V_3 - V_4) \\
 0 &= y_{34}(V_4 - V_3)
 \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$



Gambar 3.1 Diagram Impedansi [2]



Gambar 3.2 Diagram Admitansi [2]

Dengan menyusun kembali persamaan (1.2) diperoleh:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= (y_{10} + y_{12} + y_{13})V_1 - y_{12}V_2 - y_{13}V_3 \\
 I_2 &= -y_{12}V_1 + (y_{20} + y_{12} + y_{23})V_2 - y_{23}V_3 \\
 0 &= -y_{13}V_1 - y_{23}V_2 + (y_{13} + y_{23} + y_{34})V_3 - y_{34}V_4 \\
 0 &= -y_{34}V_3 + y_{34}V_4
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Sehingga dari persamaan (2.8) kita dapat menyederhanakan koefisien dari persamaan tersebut menjadi sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= (y_{10} + y_{12} + y_{13}) \\
 Y_{22} &= (y_{20} + y_{12} + y_{23}) \\
 Y_{33} &= (y_{13} + y_{23} + y_{34}) \\
 Y_{44} &= y_{34} \\
 Y_{12} &= Y_{21} = -y_{12} \\
 Y_{13} &= Y_{31} = -y_{13} \\
 Y_{23} &= Y_{32} = -y_{23} \\
 Y_{34} &= Y_{43} = -y_{34}
 \end{aligned}$$

Sehingga persamaan (2.8) dapat kita nyatakan kembali sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned}
 I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 \\
 I_2 &= Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \\
 I_3 &= Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 \\
 I_4 &= Y_{41}V_1 + Y_{42}V_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4
 \end{aligned} \right\} \tag{2.9}$$

Maka dari itu, hubungan antara bus 1 dan bus 4, dan bus 2 dengan bus 4 tidak ada, maka $Y_{14} = Y_{41} = 0$, dan $Y_{24} = Y_{42} = 0$. Apabila kita perluas hubungan bus pada jaring sistem tenaga menjadi jumlah n bus sistem, maka persamaan tegangan node dalam bentuk matriks menjadi sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ I_i \\ \cdot \\ \cdot \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{n3} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_i \\ \cdot \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix}$$

$$\text{atau } I_{\text{bus}} = Y_{\text{bus}} \cdot V_{\text{bus}} \quad (2.10)$$

Notasi I_{bus} merupakan vektor injeksi arus bus (sumber arus eksternal). Arus merupakan positif saat mengalir masuk ke dalam bus dan negatif saat meninggalkan bus. Notasi V_{bus} adalah vektor dari tegangan bus yang diukur dari node referensi. Y_{bus} adalah matriks admitansi bus.

Elemen diagonal masing-masing node merupakan jumlah admitansi yang terhubung ke dalam bus atau disebut dengan admitansi diri (*self admittance*), yakni:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \quad (2.11)$$

Elemen *off* diagonal adalah sama dengan bagian negatif admitansi antar node yang dikenal dengan mutual admitansi atau transfer admitansi sebagai berikut.

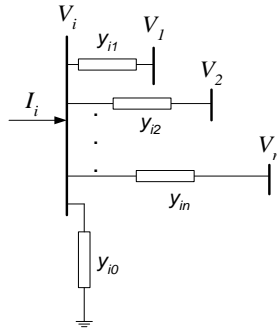
$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2.12)$$

Saat arus bus diketahui dari persamaan (2.10), maka tegangan untuk n bus adalah sebagai berikut.

$$V_{\text{bus}} = Y_{\text{bus}}^{-1} I_{\text{bus}} \quad (2.13)$$

Model Persamaan Aliran Daya

Perhatikan bus seperti gambar di bawah ini dan juga jaringan transmisi yang direpresentasikan dengan model rangkaian π , impedansi jaring dalam satuan p.u dan base MVA base bersama.



Gambar 3.3 Contoh Bus Sistem Tenaga [2]

Dengan menerapkan KCL, maka diperoleh arus I_i sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_i &= y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \\ &= (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - \dots - y_{in}V_n \end{aligned} \quad (2.14)$$

atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij}V_j \quad j \neq i \quad (2.15)$$

Maka dari itu, daya real P dan reaktif Q pada bus i dapat dinyatakan sebagai berikut [2]:

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2.16)$$

atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.17)$$

Dengan menyubstitusikan harga I_i ke dalam persamaan 2.15, maka diperoleh:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.18)$$

Dengan $V_i = |V_i| \angle \delta_i$ dan $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$

Dengan memisahkan bagian real dan imajiner persamaan (2.18), maka bentuk *hybrid* persamaan aliran dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$P_i = V_i^2 (G_i + G_{i0}) - V_i \sum_{j \neq i}^n V_j \{G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)\} \quad (2.19)$$

$$Q_i = -V_i^2 (B_i + B_{i0}) + V_i \sum_{j \neq i}^n V_j \{G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.19) dan (2.20) selanjutnya digunakan dalam permasalahan aliran daya optimal. Persamaan (2.15) dapat juga dinyatakan dalam bentuk matriks admitansi bus sebagai berikut.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.21)$$

Persamaan (2.21) bus j mencakup ke dalam bus i , sehingga dapat dinyatakan dalam bentuk polar sebagai berikut.

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.22)$$

Dengan menyubstitusikan persamaan (2.22) ke dalam persamaan (2.17) diperoleh sebagai berikut.

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.23)$$

Dengan memisahkan bagian real dan imajiner persamaan (2.23), maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$P_i = \sum_{j=i}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.24)$$

$$Q_i = -\sum_{j=i}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.25)$$

Keterangan: $V_i = V_i e^{j\delta_i}$, $V_j = V_j e^{j\delta_j}$ dan $Y_{ij} = Y_{ij} e^{j\theta_{ij}}$.

Power *mismatch* P dan Q pada bus i adalah sebagai berikut.

$$\Delta P_i = P_i^{sch} - P_i \quad (2.26)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{sch} - Q_i \quad (2.27)$$

keterangan:

P_i dan Q_i dihitung dari persamaan (2.24) dan (2.25)

ΔP dan ΔQ = daya aktif dan reaktif *mismatch*

P_i^{sch} dan Q_i^{sch} = *schedule* daya aktif dan reaktif

Dengan menggunakan metode Newton-Raphson, maka persamaan (2.24) dan (2.25) dapat diselesaikan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

J merupakan matriks Jacobian yang diambil dari turunan parsial persamaan (2.24) dan (2.25) dengan penjelasan sebagai berikut.

- Elemen diagonal dan *off* diagonal dari J_1 adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.30)$$

- Elemen diagonal dan *off* diagonal dari J_2 adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2V_i Y_{ii} \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.32)$$

- Elemen diagonal dan *off* diagonal dari J_3 adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.34)$$

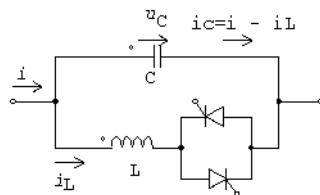
- Elemen diagonal dan *off* diagonal dari J_4 adalah:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2V_i Y_{ii} \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (2.36)$$

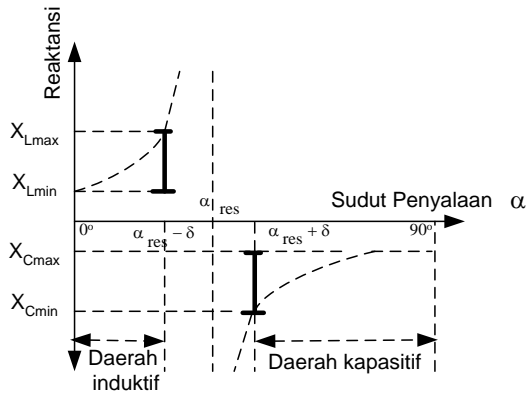
Thyristor Controlled Series Capacitor

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) dimodelkan sebagai *capasitor* C seri yang diparalelkan dengan induktor L dan dikontrol *thyristor* seperti gambar di bawah ini.



Gambar 3.4 Rangkaian Ekuivalen TCSC [3]

Reaktansi TCSC secara matematis didefinisikan sebagai hubungan antara sudut tunda penyalaaan dan reaktansi seri X_{min}^{TCSC} yang dihasilkan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 3.5 Range Operasi TCSC (Solid Lines) dan Daerah yang Diizinkan untuk Reaktansi (Bold Line) [3]

Suseptansi $B_{TCSC} = (X_{min}^{TCSC})^{-1}$ dihitung sebagai berikut[5-8]:

$$B^{TCSC}(\alpha) = B_L \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \quad (2.37)$$

$$B_L = \frac{1}{\omega L}, \quad B_C = -\omega C$$

Notasi B_L merupakan nilai suseptansi dari induktor L , sedangkan B_C adalah nilai suseptansi dari kapasitor C . Notasi B_L memiliki nilai positif dan B_C memiliki nilai negatif. Nilai reaktansi X^{TCSC} dihasilkan untuk sudut penyalaaan *thyristor* antara 0° dan 90° seperti Gambar 2.5 di atas, di mana garis solid line untuk mode induktif ($X_{min}^{TCSC} > 0$) dan mode kapasitif $X_{min}^{TCSC} < 0$. Sudut penyalaaan α dapat diatur antara 0° hingga 90° sehingga menghasilkan reaktansi minimum dalam region induktif X_{Lmin} dan

reaktansi maksimum berada dalam daerah kapasitif X_{Cmax} . Persamaan atas kondisi tersebut adalah sebagai berikut [7].

$$X_{Lmin} = \frac{1}{1/X_L + 1/X_C} = \frac{1}{B_L + B_C} \quad (2.38)$$

$$X_{Cmax} = X_C = 1/B_C \quad (2.39)$$

Nilai-nilai ini bisa dipenuhi dengan cara mengatur nilai α pada persamaan (2.37). TCSC memiliki daerah resonansi pada α_{res} sehingga dalam sudut penyalan ini, reaktansi induktif dan kapasitif beresonansi. Sudut *security margin* δ harus dijaga di sekitar sudut α_{res} sebagai berikut.

$$\alpha < \alpha_{res} - \delta \quad \text{dan} \quad \alpha > \alpha_{res} + \delta \quad (2.40)$$

Dari gambar sebelumnya juga kita bisa ketahui bahwa sudut resonansi α_{res} ditunjukkan dengan garis vertikal *dotted* dan reaktansi berada dalam daerah operasi garis *dotted* kurva tersebut. Artinya, limit konstrain X_{min} TCSC dan X_{max} TCSC dapat dihitung dengan menggunakan sudut penyalan resonansi dan sudut *security margin* δ .

Suatu penyederhanaan dibuat untuk konstrain reaktansi TCSC dalam area resonansi (lihat Gambar 2.5), di mana parameter X^{TCSC} dibatasi oleh:

$$X^{TCSC} \leq X_{Cmax} \quad \text{dan} \quad X^{TCSC} \geq X_{Lmin} \quad (2.41)$$

Maka dari itu, persamaan (2.41) dapat disederhanakan sebagai berikut.

$$X^{TCSC} \leq X_{res} \quad \text{dan} \quad X^{TCSC} \geq X_{res} \quad (2.42)$$

dan

$$X_{res} = \max(X_{Lmin}, -X_{Cmax}) \quad (2.43)$$

Persamaan (2.42) menunjukkan, bahwa konstrain reaktansi X_{TCSC} dibatasi dalam suatu area (lihat Gambar 2.5) yang didefinisikan dengan X_{min} dan X_{max} sebagai berikut [5-8].

$$X_{\min} \leq X_{TCSC} \leq X_{\max} \quad (2.44)$$

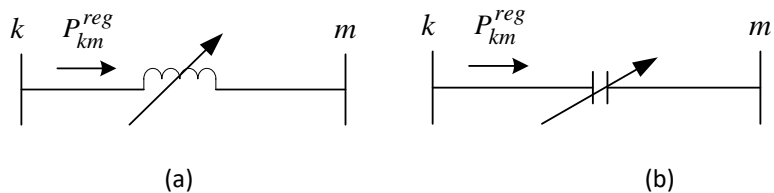
dengan:

$$X_{\min} = X_{TCSC}(\alpha_{res} + \delta)$$

$$X_{\max} = X_{TCSC}(\alpha_{res} - \delta)$$

Model Aliran Daya TCSC

Model aliran daya TCSC yang dijelaskan dalam bagian ini didasarkan pada konsep reaktansi seri. Nilai reaktansi diatur secara otomatis untuk mengatur aliran daya yang mengalir pada jaring dengan nilai tertentu. Nilai reaktansi ditentukan secara efisien menggunakan metode Newton. Perubahan reaktansi TCSC X_{TCSC} , ditunjukkan pada dua gambar di bawah ini, yang mana merepresentasikan nilai reaktansi ekuivalen TCSC saat dioperasikan sebagai induktif mode atau kapasitif mode [9].



Gambar 3.6 Rangkaian Ekuivalen Mode Operasi TCSC [9]

a. TCSC dalam Induktif mode

b. TCSC dalam Induktif mode

Berdasarkan gambar di atas, matriks admitansi TCSC dapat dituliskan sebagai berikut [9].

$$\begin{bmatrix} I_k \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jB_{kk} & jB_{km} \\ jB_{mk} & jB_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_k \\ V_m \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Untuk mode operasi induktif diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned} B_{kk} = B_{mm} &= -\frac{1}{X_{TCSC}} \\ B_{km} = B_{mk} &= \frac{1}{X_{TCSC}} \end{aligned} \right\} \quad (2.46)$$

Untuk mode operasi kapasitif, tanda operasi persamaan (2.46) di atas berubah sebaliknya sehingga persamaan daya aktif dan daya reaktif pada bus k adalah sebagai berikut.

$$P_k = V_k V_m B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) \quad (2.47)$$

$$Q_k = -V_k^2 B_{kk} - V_k V_m B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) \quad (2.48)$$

Sementara untuk persamaan daya pada bus m , tanda *subscript* k dan m dalam persamaan (2.47) dan (2.48) diubah.

Dalam penyelesaian Newton-Rapshon, persamaan (2.47) dan (2.48) dilinierisasi. Khususnya untuk kondisi seperti gambar di atas, reaktansi seri TCSC mengatur jumlah aliran daya aktif dari bus k ke bus m sebesar P_{km}^{reg} dinyatakan sebagai berikut [9].

$$\begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km}^{X_{TCSC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_k}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_m}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_k}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_k}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \theta_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial Q_m}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \\ \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial \theta_m} & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial V_k} V_k & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial V_m} V_m & \frac{\partial P_{km}^{X_{TCSC}}}{\partial X_{TCSC}} X_{TCSC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \theta_m \\ \frac{\Delta V_k}{V_k} \\ \frac{\Delta V_m}{V_m} \\ \frac{\Delta X_{TCSC}}{X_{TCSC}} \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

Nilai $\Delta P_{km}^{X_{TCSC}}$ adalah $\Delta P_{km}^{X_{TCSC}} = P_{km}^{reg} - P_{km}^{X_{TCSC},cal}$ yakni nilai aliran daya aktif *mismatch*. Nilai ΔX_{TCSC} adalah $\Delta X_{TCSC} = X_{TCSC}^{(i)} - X_{TCSC}^{(i-1)}$ merupakan perubahan incremental reaktansi TCSC. Sedangkan nilai

$P_{km}^{X_{TCSC},cal}$ adalah daya yang dihasilkan dari persamaan (2.47). Variabel *state* X_{TCSC} yang di-update pada akhir masing-masing step iterasi adalah sebagai berikut.

$$\Delta X_{TCSC}^{(i)} = X_{TCSC}^{(i-1)} + \left(\frac{\Delta X_{TCSC}}{X_{TCSC}} \right) X_{TCSC}^{(i-1)} \quad (2.50)$$

Analisis Kestabilan Tegangan

Beberapa dekade terakhir isu kestabilan tegangan dalam sistem tenaga menjadi perhatian di kalangan para ilmuwan. Fenomena ketidakstabilan tegangan memiliki tenggang waktu dari beberapa detik hingga beberapa jam, serta sudah diinvestigasi menggunakan model statik dan dinamik.

Salah satu relevansi yang berkaitan dengan pembahasan kali ini ialah fenomena perubahan beban dalam permasalahan aliran daya optimal. *Voltage Collapse* secara umum dipengaruhi penambahan beban dalam sistem yang dikarakteristikan dengan kondisi pembebanan yang berat (*heavy loading*) dan/atau terjadi perubahan dalam sistem, misalnya salah satu jaring terputus.

Parameter Pembebanan dan Arah Daya (*Loading Parameter dan Power Direction*)

Banyak model analisis untuk menginvestigasi fenomena *Voltage Collapse*, misalnya teori bifurkasi sebagai bentuk teori matematika yang mampu mengklasifikasikan ketidakstabilan, mempelajari kelakuan sistem yang mendekati tegangan *collapse* atau titik ketidakstabilan, serta menginformasikan informasi yang kuantitatif untuk aksi korektif untuk menghindari kondisi kritis. Dalam teori bifurkasi, asumsi yang digunakan ialah bahwa persamaan sistem tergantung pada suatu *setting* parameter yang tergabung dalam variabel *state*, sebagai berikut [10,11].

$$0 = f(x, \lambda) \quad (2.51)$$

Stabil atau tidak stabil berkaitan dengan perubahan parameter tersebut secara perlahan. Parameter ini digunakan sebagai pendekatan dalam menginvestigasi *Voltage Collapse* yang disebut dengan *loading parameter* $\lambda (\lambda \in \Re)$. Sementara persamaan (2.52) dan (2.53) merupakan persamaan daya generator dan beban yang dimodifikasi sebagai berikut [1,20,22,23].

$$P_{G1} = (1 + \lambda)(P_{G0} + P_S) \quad (2.52)$$

$$P_{L1} = (1 + \lambda)(P_{L0} + P_D) \quad (2.53)$$

Daya yang dikalikan dengan λ disebut *power direction*, persamaan (2.52) dan (2.53) berbeda dengan model yang digunakan dalam analisis *continuation Power Flow* (CPF), yakni:

$$P_{G2} = P_{G0} + \lambda P_S \quad (2.54)$$

$$P_{L2} = P_{L0} + \lambda P_D \quad (2.55)$$

Berdasarkan persamaan di atas, parameter pembebanan hanya mempengaruhi variabel daya P_S dan P_D . Setelah ini penulis akan membahas alasan pemicunya yang mengacu pada persamaan di atas dalam metode optimasi yang digunakan. Diagram bifurkasi tegangan digambarkan sebagai fungsi λ yang diukur berdasarkan kemampuan pembebanan sehingga diagram tersebut biasa dikenal dengan kurva *P-V* atau kurva *nose*.

Saddle Node Bifurcations

Saddle Node Bifurcation (SNB) identik dengan karakteristik dua bagian yang seimbang (*equilibrium*). Satu *point* merupakan bagian stabil dan satu *point* lainnya merupakan bagian yang tidak stabil. Nilai penggabungan kedua *point* ini ada di suatu *point* yang seimbang untuk parameter pembebanan λ , yakni pada pembebanan kritis λ_c adalah $\lambda = \lambda_c$.

Variabel skalar λ ditentukan sebagai parameter pembebanan atau "*bifurcating*". Perubahan pada parameter ini memberikan efek beban mekanik sistem yang berakibat pada perubahan *demand* daya aktif dan reaktif sehingga berimplikasi pada tegangan. Inilah yang dianggap sebagai

permasalahan dalam studi *Voltage Collapse*. Untuk menyelesaikan permasalahan ini, persamaan nonlinier sistem dilinearisasi untuk masing-masing *point equilibrium* pada model sistem yang berbeda.

Dalam *equilibrium, point* λ dapat berubah dari bagian stabil menuju bagian tidak stabil atau sebaliknya. Titik perubahan *operating point* dari daerah stabil menuju daerah tidak stabil atau sebaliknya dikenal dengan nama titik bifurkasi.

Fenomena *Saddle Node Bifurcation* dapat dipresentasikan menggunakan persamaan aljabar diferensial (*Differential and Algebraic Equation, DAE*) sebagai berikut[12].

$$x = f(x, y, \lambda) \quad (2.56)$$

$$0 = g(x, y, \lambda) \quad (2.57)$$

Notasi $x \in \mathfrak{R}^n$ adalah vektor variabel *state* yang berkaitan dengan elemen sistem seperti generator dan peralatan kontrolnya. Kemudian notasi $\lambda \in \mathfrak{R}^l$ ialah suatu parameter dalam sistem yang berubah secara perlahan, bergerak dari satu *point equilibrium* ke *point* yang lain hingga bifurkasi terjadi. Fungsi $f : \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^m \times \mathfrak{R}^l \rightarrow \mathfrak{R}^n$ sendiri berhubungan dengan bidang vektor nonlinear yang berasosiasi secara langsung dengan variabel *state* x , sedangkan vektor $y \in \mathfrak{R}^m$ merupakan vektor variabel aljabar yang didefinisikan oleh fungsi aljabar nonlinear $g : \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R}^m \times \mathfrak{R}^l \rightarrow \mathfrak{R}^m$ yang berhubungan dengan tegangan dan sudut *load bus*. *Point equilibrium* bifurkasi sendiri memiliki nilai x_o, y_o, λ_o dengan perubahan *rate* masing-masing variabel *state* adalah *zero* yaitu [10].

$$0 = f(x, y, \lambda) \quad (2.58)$$

$$0 = g(x, y, \lambda) \quad (2.59)$$

Ketika konstrain aljabar Jacobian $D_y g(\cdot)$ pada persamaan (2.57) adalah nonsingular dalam *trajectory system*, maka model sistem dapat diasumsikan dengan [12] sebagai berikut.

$$y = h(x, \lambda) \quad (2.60)$$

$$x = f(x, h(x, \lambda), \lambda) \quad (2.61)$$

$$x = s(x, \lambda) \quad (2.62)$$

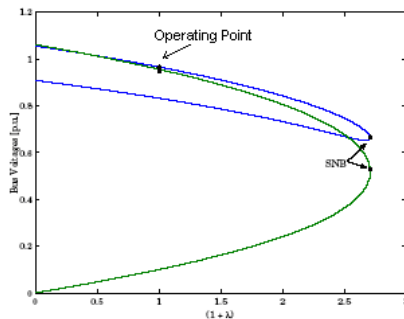
Secara matematis, SNB didefinisikan menggunakan kondisi *transversality*, di mana apabila kondisi *transversality* dijumpai, maka sistem berada pada *Saddle Node Bifurcation*. Kondisi untuk *Saddle Node Bifurcation* tersebut adalah [13,14] sebagai berikut.

$$D_x f|_c v = D_x^T f|_c w = 0 \quad (2.63)$$

$$w^T \frac{\partial f}{\partial \lambda} \Big|_c \neq 0 \quad (2.64)$$

$$w^T [D_x^2 f|_c v] v \neq 0 \quad (2.65)$$

Notasi v dan w merupakan nilai normalisasi *eigenvector* kiri dan kanan dalam \mathfrak{R}^n dari $D_x f|_c$. Tanda *subscript c* digunakan untuk menyatakan titik bifurkasi. Kondisi persamaan (2.63) menyatakan kondisi matriks Jacobian sistem menjadi singular, sementara kondisi persamaan 3.64 dan 2.65 menyatakan kondisi yang memastikan bahwa bagian yang *equilibrium* yang mendekati (x_c, λ_c) untuk $\lambda > \lambda_c$ atau $\lambda < \lambda_c$ tidak ada.



Gambar 3.7 Bentuk Kurva Nose dari Suatu Sistem Tenaga yang merepresentasikan SNB [1]

Gambar di atas merupakan suatu kurva *nose* yang merepresentasikan SNB, dengan karakteristik sebagai berikut.

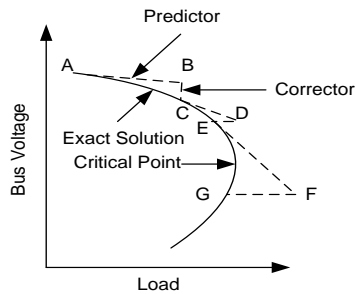
1. Memiliki dua bangunan seimbang (*equilibrium*), di mana bagian yang satu adalah daerah stabil, dan bagian lainnya adalah daerah yang bagian tidak stabil.
2. Sensitivitas terhadap λ dari suatu variabel *state* adalah *infinite*.
3. Sistem matriks Jacobian memiliki *zero eigenvalue*.
4. Dinamika *collapse* dalam pendekatan nilai bifurkasi dikarakterisasi sebagai perubahan monoton variabel *state*.

Metode yang relevan untuk menentukan titik *collapse* tegangan sistem (SNB *point*) ialah *continuation method* dan *maximization of the distance to collapse method* yang mana akan dibahas lebih lanjut berkaitan dengan optimasi aliran daya.

Continuation Power Flow (CPF)

Metode CPF digunakan untuk menentukan kurva *P-V* sistem yang memberikan estimasi nilai pembebanan maksimum dan nilai kritis untuk *saddle-node bifurcation* (SNB), *limit-induce bifurcation* (LIB). Meskipun CPF memerlukan komputasi numerik yang besar, perhitungan CPF tidak dipengaruhi oleh ketidakstabilan komputasi numerik. Pada kenyataannya, CPF mampu menentukan kestabilan dan ketidakstabilan melalui kurva *P-V*.

CPF umumnya terdiri atas *Predictor Step* yang direalisasikan menggunakan komputasi *tangent vector* dan *corrector step* yang ditentukan oleh *local parametrization* atau *perpendicular intersection* [11,13]. Analisis CPF menggunakan proses iterasi tertentu dengan predictor *corrector step* seperti yang secara visualisasi dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Dari suatu inisial penyelesaian (A), tangen predictor tertentu digunakan untuk mengestimasi penyelesaian (B) untuk bentuk penambahan beban yang spesifik. Setelah itu, *corrector step* menentukan penyelesaian eksak (C) menggunakan analisis aliran daya konvensional dengan asumsi sistem pembebanan adalah tetap [15].



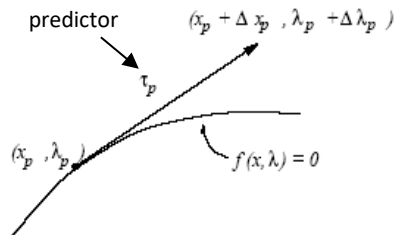
Gambar 3.8 Urutan Kalkulasi dalam Analisis CPF [15]

Tegangan untuk kondisi kenaikan beban dapat diprediksi berdasarkan tangen predictor yang baru. Apabila estimasi beban yang baru (D) sekarang ada di beban maksimum untuk penyelesaian eksak, maka *corrector step* dengan beban tetap menjadi tidak konvergen. Karena itulah *corrector step* dengan tegangan tetap pada bus yang dimonitor dan diaplikasikan untuk memperoleh penyelesaian eksak (E). Setelah batas kestabilan tegangan dicapai, penentuan beban eksak maksimum menjadi berkurang secara gradual selama proses *Predictor Step*.

Predictor Step

Dari gambar di bawah ini, maka nilai p dalam suatu *equilibrium* generik dinyatakan dalam hubungan sebagai berikut [1,11,16,17].

$$f(x_p, \lambda_p) = 0 \Rightarrow \left. \frac{df}{d\lambda} \right|_p = 0 = D_x f \Big|_p \frac{dx}{d\lambda} \Big|_p + \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|_p \quad (2.66)$$



Gambar 3.9 Predictor Step yang Dihitung dengan Cara Tangent Vector [1]

dan *tangent vector* dapat didekati dengan:

$$\tau_p = \left. \frac{dx}{d\lambda} \right|_p \approx \frac{\Delta x_p}{\Delta \lambda_p} \quad (2.67)$$

Dari persamaan (2.66) dan (2.67), maka diperoleh:

$$\tau_p = -D_x f|_p^{-1} \left. \frac{\partial f}{\partial \lambda} \right|_p \quad (2.68)$$

$$\Delta x_p = \tau_p \Delta \lambda_p$$

Dari persamaan (2.68), maka nilai step kontrol k dipilih untuk menentukan penambahan Δx_p dan $\Delta \lambda_p$ sepanjang kondisi normalisasi untuk menghindari step yang besar, sehingga saat $\|\tau_p\|$ menjadi besar, maka Δx_p dan $\Delta \lambda_p$ menjadi sebagai berikut.

$$\Delta \lambda_p = \frac{\Delta k}{\|\tau_p\|} \quad (2.69)$$

$$\Delta x_p = \frac{\Delta k \tau_p}{\|\tau_p\|} \quad (2.70)$$

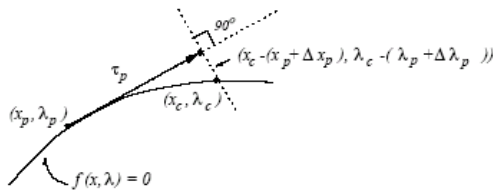
Corrector Step

Di dalam *corrector step*, sekumpulan dari $(n+1)$ persamaan diselesaikan dengan persamaan (2.71) dan persamaan (2.72) [1,11,16,17] sebagai berikut.

$$f(x, \lambda) = 0 \quad (2.71)$$

$$\eta(x, \lambda) = 0 \quad (2.72)$$

Penyelesaian dari f harus dalam variasi bifurkasi, yang mana η merupakan persamaan tambahan untuk menjamin nonsingular set pada *point* bifurkasi. Untuk pemilihan η , ada dua opsi yakni *perpendicular intersection* dan *local parametrization*.



Gambar 3.10 Komputasi *Corrector Step* Menggunakan *Perpendicular Intersection* [1]

Dari gambar di atas, maka ekspresi η dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$\eta(x, \lambda) = \begin{bmatrix} \Delta x_p \\ \Delta \lambda_p \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} x_c - (x_p + \Delta x_p) \\ \lambda_c - (\lambda_p + \Delta \lambda_p) \end{bmatrix} = 0 \quad (2.73)$$

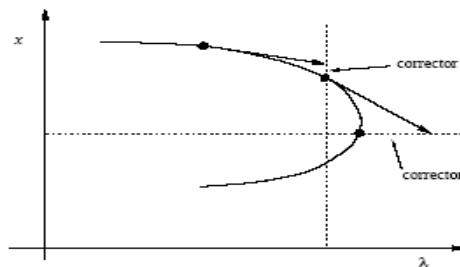
Namun demikian, untuk *local parametrization*, salah satu parameter λ atau variabel x digunakan untuk menyelesaikan persamaan (2.74) sebagai berikut.

$$\eta(x, \lambda) = \lambda_c - (\lambda_p + \Delta \lambda_p) \quad (2.74)$$

atau

$$\eta(x, \lambda) = \lambda_{ci} - (\lambda_{pi} + \Delta \lambda_{pi}) \quad (2.75)$$

Pemilihan variabel yang ditetapkan didasarkan pada variasi bifurkasi f seperti yang digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3.11 Komputasi *Corrector Step* dengan Cara *Local Parametrization* [1]

Aliran Daya Optimal dengan Konstrain Kestabilan Tegangan

Permasalahan *Optimal Power Flow* (OPF) sudah dikenalkan sejak tahun 1960 oleh Carpenter di mana saat ini sudah tumbuh dan berkembang sebagai perlengkapan analisis dalam operasi dan perencanaan sistem tenaga. Permasalahan OPF umumnya merupakan permasalahan nonlinier *nonlinear programming problem* (NLP) yang digunakan untuk menentukan *setting* optimal parameter kontrol dengan mengurangi kemungkinan fungsi objektif yang diinginkan dan fungsi subjektif terhadap konstrain sistem yang ditentukan. Karena adanya restrukturisasi dalam sistem tenaga, maka perbedaan permasalahan OPF saat ini menjadi permasalahan yang diperhatikan. Terlebih lagi masalah ini sudah berkaitan dengan isu kestabilan tegangan dan hubungannya dengan permasalahan metode OPF.

Penyelesaian permasalahan nonlinier yang besar dan sulit dapat diselesaikan seiring dengan perkembangan teknik dan algoritma optimasi seperti *interior point methods* (IPM). Dalam hal ini penulis akan memperkenalkan permasalahan OPF dan penggunaan IPM untuk menyelesaikan permasalahan NLP.

Optimasi Jarak Maksimum *Voltage Collapse*

Sudah banyak diaplikasikan permasalahan optimasi untuk *Voltage Collapse (maximization of the distance to collapse)* sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Max. } & \lambda & (2.76) \\ \text{s.t } & f(x, \lambda) = 0 \end{aligned}$$

Fungsi Lagrange diasosiasikan dengan persamaan (2.76) dengan penulisan sebagai berikut.

$$\mathcal{L}(x_*, \lambda_*, \rho) = \lambda - \rho^T f(x, \lambda) \quad (2.77)$$

Notasi ρ merupakan faktor pengali Lagrange atau dikenal dengan dual variabel dan kondisi optimal persamaan (2.76), yang mana dapat dipenuhi dengan orde pertama optimasi Karush-Kuhn Tucker (KKT) sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x} &= -\rho^T D_x f(x, \lambda) = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \rho} &= -f(x, \lambda) = 0 \\ \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \lambda} &= 1 - \rho^T \frac{\partial}{\partial \lambda} f(x, \lambda) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.78)$$

Faktor pengali Lagrange ρ berkaitan dengan elemen kiri *eigenvector* $\hat{\omega}$. Model (2.76) dapat diperluas menjadi dua bagian. Pertama ialah menambahkan konstrain ketidaksamaan (*inequality*) seperti limit tegangan, limit daya reaktif generator dan limit termal. Sementara kedua yakni memodifikasi persamaan (2.76) untuk memaksimalkan jarak untuk *collapse*.

Dengan demikian, maka persamaan (2.76) dapat didekati dengan persamaan aliran daya, satu bagian untuk nilai arus bifurkasi. Sementara untuk satu bagian lainnya untuk penyelesaian nilai “*kritis*” yang diasosiasikan dengan salah satu kondisi *Voltage Collapse* SNB atau LIB atau *security limit* sebagai berikut.

$$\text{Max. } \lambda_c - \lambda_p \quad (2.79)$$

$$\text{s.t } f(\theta_p, V_p, Q_{Gp}, P_S, P_D, \lambda_p) = 0$$

$$f(\theta_c, V_c, Q_{Gc}, P_S, P_D, \lambda_c) = 0$$

$$\underline{H}_p \leq H(\theta_p, V_p, Q_{Gp}) \leq \bar{H}_p$$

$$\underline{H}_c \leq H(\theta_c, V_c, Q_{Gc}) \leq \bar{H}_c$$

Notasi H adalah fungsi konstrain dari variabel tak bebas dan \underline{H} , \bar{H} limit bawah dan atas, dan model beban diasumsikan seperti persamaan (2.53) dan (2.55). Sufiks p dan c merupakan representasi dari kondisi *operating point* dan nilai kritis pengoperasian (*critical operating point*).

Multi Objektif OPF dalam Konstrain Kestabilan Tegangan

Dalam hal ini, *routine* optimasi yang digunakan merupakan penerapan dari beberapa sumber yang sudah ada [1,18,19,20]. Berikut adalah *routine* OPF yang digunakan dengan melibatkan konstrain kestabilan tegangan.

- **Model Optimasi *Single-Period***

Bentuk umum permasalahan optimasi yang diimplementasikan di sini dinyatakan dengan model pemrograman nonlinier sebagai berikut.

Fungsi objektif:

$$\text{Max}_{(x,p,\hat{x},\lambda)} G(p, \lambda) \quad (2.80)$$

Fungsi subjektif:

$$f(x, p) = 0$$

$$g(\hat{x}, p, \lambda) = 0$$

$$\lambda_{\min} \leq \lambda \leq \lambda_{\max}$$

$$h_{\min} \leq h(x, p) \leq h_{\max}$$

$$\hat{h}_{\min} \leq h(\hat{x}, p) \leq \hat{h}_{\max}$$

$$p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$$

Notasi $x, \hat{x} \in \mathfrak{R}^n$ adalah variabel bebas seperti *phasor* tegangan, kemudian $p \in \mathfrak{R}^m$ adalah variabel kontrol seperti daya *demand* P_D dan suplai P_S , sedangkan $\lambda \in \mathfrak{R}$ adalah parameter pembebanan. Fungsi $G: \mathfrak{R}^m \mapsto \mathfrak{R}$, $f, g: \mathfrak{R}^m \times \mathfrak{R}^n \mapsto \mathfrak{R}^n$ dan $h, \hat{h}: \mathfrak{R}^n \mapsto \mathfrak{R}^l$ didefinisikan sebagai berikut.

Fungsi Objektif

Model mekanisme pasar fungsi objektif dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$G = \sum_i C_{Di}(P_{Di}) - \sum_i C_{Si}(P_{Si}) \quad (2.81)$$

Persamaan (2.81) merupakan pengurangan surplus konsumen (*demand*) dengan surplus produsen (pembangkit) tentang keuntungan yang diperoleh (*social welfare* atau *social benefit*, \$/h). Persamaan tersebut dihitung dalam dua bentuk. Bentuk pertama ialah jumlah daya *demand bids* P_D yang diterima dikalikan dengan biaya *demand* C_D (\$/MWh), sedangkan bentuk kedua ialah jumlah suplai *bid* produksi P_S yang dikalikan dengan biaya produksi C_S (\$/MWh).

Sementara model multi-objektif OPF yang melibatkan konstrain kestabilan tegangan yang digunakan ialah dengan memasukkan parameter pembebanan maksimum dalam fungsi objektif [20].

$$\text{Max. } G = \omega_1 \left(\sum_i C_{Di}(P_{Di}) - \sum_i C_{Si}(P_{Si}) \right) + \omega_2 \lambda \quad (2.82)$$

Dalam fungsi objektif G persamaan (2.82), terdapat dua bentuk pernyataan yang menentukan akhir penyelesaian berdasarkan *weighting factor* $\omega_1=(1-\omega)$ dan $\omega_2 = \omega$ ($0 < \omega < 1$). Bentuk pertama menyatakan *social welfare* (\$/h) yang diperoleh, sedangkan bentuk kedua menyatakan batas pembebanan (*loading margin*) maksimum (p.u) yang menjamin jarak penyelesaian mekanisme pasar dan nilai kritis pembebanan ialah maksimum.

Pada kondisi pembebanan maksimum $G = \lambda$, permasalahan *security* dalam kondisi pembebanan maksimum sistem. Kondisi pembebanan maksimum λ dapat diasosiasikan dengan limit termal atau tegangan bus, limit kestabilan akibat singularitas matriks Jacobian dalam aliran daya (*Saddle Node Bifurcation*), atau limit kontrol seperti limit daya reaktif generator.

Konstrain Kesamaan (*Equality Constraints*)

Fungsi g menyatakan persamaan aliran daya sebagai berikut:

$$\left. \begin{aligned} f(\delta, V, Q_G, P_S, P_D) &= 0 \\ g(\delta_c, V_c, Q_{Gc}, \lambda_c, P_S, P_D) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.83)$$

Subscript c merepresentasikan sistem dalam kondisi *kritis*.

Beban didefinisikan sebagai berikut.

$$P_G = P_{Go} + P_S \quad (2.84)$$

$$P_L = P_{Lo} + P_D$$

P_{Go} dan P_{Lo} menyatakan daya generator dan beban awal, P_{Go} dan P_{Lo} bukan merupakan bagian *market trading*. Beban diasumsikan memiliki faktor daya yang konstan sebagai berikut.

$$Q_L = P_L \tan(\varphi_L) \quad (2.85)$$

Fungsi g yang memberikan *losses* juga dapat dinyatakan dalam keseimbangan daya (*power balance*) sebagai berikut.

$$\sum_i (P_{Goi} + P_{Si}) - \sum_i (P_{Loi} + P_{Di}) = 0 \quad (2.86)$$

Konstrain Ketidaksamaan (*Inequality Constrain*)

Dari persamaan (2.80), sejumlah konstrain ketidaksamaan dimasukkan ke dalam h yang menyatakan limit keamanan (*security limit*) sistem, dan *bid* blok untuk variabel kontrol p . Di sini limit keamanan yang digunakan mengacu pada beberapa referensi yang sudah ada [18,20].

Limit termal jaring transmisi adalah sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned} I_{ij}(\delta, V) &\leq I_{ij\max} \\ I_{ji}(\delta, V) &\leq I_{ij\max} \\ I_{ij}(\delta_c, V_c) &\leq I_{ij\max} \\ I_{ji}(\delta_c, V_c) &\leq I_{ji\max} \end{aligned} \right\} \quad (2.87)$$

Limit daya reaktif generator:

$$\left. \begin{aligned} Q_{G\min} &\leq Q_G(x, p) \leq Q_{G\min} \\ Q_{G\min} &\leq Q_{Gc}(\hat{x}, p) \leq Q_{G\min} \end{aligned} \right\} \quad (2.88)$$

Limit keamanan tegangan:

$$\left. \begin{aligned} V_{\min} &\leq V \leq V_{\max} \\ V_{\min} &\leq V_c \leq V_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (2.89)$$

Limit-limit tersebut digunakan untuk menyatakan batas keamanan sistem. Sementara limit dalam P sendiri dinyatakan sebagai berikut.

$$\left. \begin{aligned} 0 &\leq P_S \leq P_{S_{\max}} \\ 0 &\leq P_D \leq P_{D_{\max}} \end{aligned} \right\} \quad (2.90)$$

Limit Reaktansi TCSC:

$$X_{\min} \leq X_{TCSC} \leq X_{\max} \quad (2.91)$$

- **Konstrain Kondisi Pembebanan Maksimum**

Set kedua dari aspek (variabel) aliran daya adalah $\hat{x} \in \mathfrak{R}^n$. Sementara persamaan $g: \mathfrak{R}^m \times \mathfrak{R}^n \times \mathfrak{R} \mapsto \mathfrak{R}^n$ yang berasosiasi dengan konstrain $h(\hat{x}): \mathfrak{R}^n \mapsto \mathfrak{R}^l$ tentang penyelesaian yang berasosiasi dengan parameter pembebanan λ , di mana λ menyatakan suatu penambahan daya maksimum yang terjadi dalam generator dan beban, dinyatakan sebagai berikut [20,21].

$$\left. \begin{aligned} P_{Gc} &= (1 + \lambda + k_{Gc})P_G \\ P_{Lc} &= (1 + \lambda)P_L \end{aligned} \right\} \quad (2.92)$$

Notasi k_{Gc} dalam persamaan (2.92) merupakan variabel skalar yang digunakan untuk alokasi *losses* atau distribusi *losses* yang berasosiasi hanya dengan penyelesaian persamaan aliran daya maksimum. Kemudian notasi k_{Gc} digunakan untuk model standar distribusi *slack* dalam analisis bifurkasi sistem. *Subscript c* sendiri merepresentasikan limit sistem atau kondisi “*kritis*” yang berasosiasi dengan maksimum *loading margin* λ . *Loses* memiliki asumsi berhubungan dengan nilai pembebanan maksimum λ yang terdistribusi dalam semua generator. Artinya, bentuk penyelesaian

aliran daya dalam kondisi ini dapat didekati sesuai dengan referensi-referensi yang sudah ada [21], sebagai berikut.

$$P_{G_c} = (1 + \lambda + k_{G_c})P_G = P_G + \Delta P_{Gi} \quad (2.93)$$

$$\sum_{NG} \Delta P_{Gi} = P_{L_c} + P_{loss} \quad (2.94)$$

$$P_{G_c} - P_{L_c} - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j|(G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (2.95)$$

$$Q_{G_c} - Q_{L_c} - \sum_{j=1}^n |V_i||V_j|(G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (2.96)$$

Batasan *loading margin* λ sudah dimasukkan ke dalam persamaan (2.80) yang didasarkan pada kondisi pembebanan. Minimum limit λ_{min} diberikan untuk memastikan level minimum keamanan sistem dalam kondisi operasi. Sementara untuk nilai maksimum λ_{mak} merupakan nilai maksimum pembebanan pada kondisi aman. Kondisi-kondisi dapat berperan dalam memastikan, bahwa parameter pembebanan tetap dipertahankan dalam limit tersebut untuk menghindari solusi persamaan (2.80) dalam kondisi $\lambda < \lambda_{min}$ atau $\lambda < \lambda_{mak}$.

- **Available Loading Capability (ALC)**

Limit termal jaring dan keamanan tegangan dapat diasosiasikan dengan pembebanan maksimum sistem atau *Maximum Loading Condition* (MLC) dengan definisi matematis sebagai berikut [1,23].

$$MLC = (1 + \lambda) \sum_{j \in J} P_{Lj} = (1 + \lambda) \left(\sum_{j \in J} P_{Loj} + \sum_{j \in J} P_{Dj} \right) \quad (2.97)$$

Sehingga, ALC dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$ALC = MLC - \sum_{j \in J} P_{Lj} = MLC - TTL \quad (2.98)$$

TTL atau *Total Transaction Level* dalam kondisi operasi ($\sum P_{Lj}$), dengan demikian bentuk ALC menjadi:

$$ALC = \lambda \sum_{j \in J} P_{Lj} = \lambda TTL \quad (2.99)$$

Nilai ALC di sini digunakan untuk mengukur margin aman tegangan dari kondisi operasi.

Penyelesaian Permasalahan OPF

Adanya variasi fungsi objektif membuat optimalisasi dalam permasalahan OPF menjadi bervariasi. Contohnya ialah dengan memasukkan optimasi biaya daya aktif dan minimasi *losses* daya reaktif. Penyelesaian permasalahan OPF di sini mengacu pada referensi yang sudah ada [10]. Untuk memudahkan pemahaman dalam memecahkan permasalahan persamaan (2.82), maka formulasi dari permasalahan NLP dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\text{Max } G(x) \quad (2.100)$$

$$\text{s.t } F(x) = 0$$

$$\underline{H} \leq H(x) \leq \bar{H}$$

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}$$

$F(x): \mathfrak{R}^q \rightarrow \mathfrak{R}^m$ menyatakan persamaan aliran daya, sementara $H(x): \mathfrak{R}^q \rightarrow \mathfrak{R}^p$ menyatakan limit transmisi, *lower* dan *upper limit* transmisi dinyatakan dengan \underline{H} dan \bar{H} . Variabel vektor kontrol sistem dinotasikan dengan $x \in \mathfrak{R}^q$ yang meliputi magnitude dan sudut tegangan, level daya generator, reaktansi TCSC dan tap *setting* generator, *lower* dan *upper limit* variabel sistem x dinyatakan dengan \underline{x} dan \bar{x} . Pemetaan $G(x): \mathfrak{R}^q \rightarrow \mathfrak{R}$ merupakan fungsi objective seperti *losses* dalam sistem dan biaya (*cost*) pembangkit generator, serta pembebanan

maksimum atau seperti yang terangkum dalam persamaan (2.100). Di sini penulis menggunakan metode *Interior Point Method* (IPM).

- **Logaritma-Barrier Interior Point Method**

Sudah lebih dari beberapa dekade NLP dikenal dalam perkembangan penyelesaian permasalahan optimasi. Di sini, formulasi Logaritma-Barrier IPM untuk suatu NLP dengan konstrain kesamaan (*equality*) dan ketidaksamaan (*inequality*) akan segera kita ketahui.

Sederhananya, batasan $\underline{x} \leq x \leq \bar{x}$ diasumsikan telah diintegrasikan ke dalam $\underline{H} \leq H(x) \leq \bar{H}$.

Langkah pertama dalam penyelesaian (2.100) ialah penggunaan logaritma-barrier IPM (yang diperluas ke dalam pendekatan Predictor *Corrector step*), yakni transformasi konstrain ketidaksamaan ke dalam konstrain kesamaan dengan memasukkan variabel positif *slack* $s_1, s_2 \in \mathfrak{R}^p$ secara langsung. Dengan demikian, permasalahan semula dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 & \text{Max } G(x) && (2.101) \\
 & \text{s.t } F(x) = 0 \\
 & \quad H(x) - s_1 = \underline{H} \\
 & \quad H(x) + s_2 = \bar{H} \\
 & \quad s_1, s_2 > 0
 \end{aligned}$$

Dari persamaan (2.101), penggabungan permasalahan dibentuk dengan memasukkan logaritma barrier terhadap fungsi objektif agar dimasukkan secara langsung dalam konstrain positif s_1 dan s_2 sebagai berikut.

$$\text{Max } G(x) - \mu^k \sum_{i=1}^p (\log s_1(i) + \log s_2(i)) \quad (2.102)$$

$$\text{s.t } F(x) = 0$$

$$H(x) - s_1 = \underline{H}$$

$$H(x) + s_2 = \bar{H}$$

$$s_1, s_2 > 0$$

Notasi μ^k merupakan nilai positif parameter *barrier* pada iterasi ke- k^{th} . Parameter ini secara monoton dikurangi hingga nol seiring jumlah iterasi, k , bertambah. Persamaan (2.102) dapat dituliskan kembali menjadi sebagai berikut.

$$\text{Max } G(x) - \mu^k \sum_{i=1}^p (\log s_1 + \log s_2) \quad (2.103)$$

$$\text{s.t } F(x) = 0$$

$$-s_1 - s_2 - \underline{H} + \bar{H} = 0$$

$$-H(x) - s_2 + \bar{H} = 0$$

$$s_1, s_2 > 0$$

Agar persamaan (2.103) menjadi optimal untuk μ^k yang ditetapkan, maka fungsi Lagrange $L\mu(v)$ dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} L\mu(v) = & G(x) - \mu^k \sum_{i=1}^p (\log s_1 + \log s_2) \\ & - \gamma^T F(x) - v_1^T (-s_1 - s_2 - \underline{H} + \bar{H}) \\ & - v_2^T (-H(x) - s_2 + \bar{H}) \end{aligned} \quad (2.104)$$

$v := [x; s_1; s_2; \gamma; v_1; v_2]$ ditulis untuk memudahkan penjelasan, bahwa $\gamma \in \mathfrak{R}^m$, dan $v_1, v_2 \in \mathfrak{R}^p$ adalah vektor pengali Lagrange yang sering disebut *dual variabel*.

Kondisi optimal dari orde satu Karush-Kuhn-Tucker (KKT) mendefinisikan kondisi minimum persamaan (2.104) seperti berikut.

$$\nabla_v L_\mu(v) = \begin{vmatrix} DxG(x) - J_F(x)^T \gamma + J_H(x)^T v_2 \\ -\mu^k S_1^{-1} I + v_1 \\ -\mu^k S_2^{-1} I + (v_1 + v_2) \\ -F(x) \\ s_1 + s_2 + \bar{H} - \bar{H} \\ H(x) + s_2 - \bar{H} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.105)$$

$l := (1,1,1,\dots,1)^T$ merupakan vektor satuan (*ones*) dan $S_1 = \text{diag}(s_1)$ dan $S_2 = \text{diag}(s_2)$. Fungsi $\text{diag}(s): \mathfrak{R}^p \rightarrow \mathfrak{R}^{p \times p}$ sendiri membentuk suatu matriks diagonal dengan i^{th} diagonal yang sama dengan elemen vektor s , sedangkan $J_F(x) \in \mathfrak{R}^{m \times q}$ dan $J_H(x) \in \mathfrak{R}^{p \times q}$ adalah matriks Jacobian dari fungsi $F(x)$ dan $H(x)$, di mana $J_F(x) = D_x F(x)$ dan $J_H(x) = D_x H(x)$.

Untuk mengurangi jumlah komponen linier, bentuk kedua diskalakan dengan S_1 dan ketiga dengan S_2 adalah sebagai berikut.

$$\nabla_v L_\mu(v) = \begin{vmatrix} DxG(x) - J_F(x)^T \gamma + J_H(x)^T v_2 \\ -\mu^k I + S_1 v_1 \\ -\mu^k I + S_2 (v_1 + v_2) \\ -F(x) \\ s_1 + s_2 + \bar{H} - \bar{H} \\ H(x) + s_2 - \bar{H} \end{vmatrix} = 0 \quad (2.106)$$

Interpretasi sistem terdiri dari enam bentuk. Bentuk pertama selama $(v_1, v_1+v_2) > 0$ adalah untuk dual feasibility; bentuk kedua dan ketiga adalah kondisi μ -keseimbangan (μ -complementary) dan bentuk keempat hingga bentuk keenam selama $(s_1, s_2) > 0$ adalah untuk *primal feasibility*.

Langkah penyelesaian sistem nonlinier didefinisikan oleh (2.106), bahwa untuk set μ^k , step iterasi ditentukan dengan metode newton, sepanjang step variabel persamaan (2.106) dihitung dan diperbarui. Algoritma berhenti saat primal, dual dan kondisi *complementary* berada lebih kecil dari nilai toleransi yang ditentukan. Bersamaan dengan itu, k bertambah, parameter *barrier* μ^k berkurang dan perhitungan baru iterasi Newton bisa ditentukan. Perbedaan susunan penyelesaian yang ada digunakan untuk mereduksi μ dan penskalaan step iterasi newton tergantung pada tipe permasalahan. Dalam implementasi penulisan, parameter *barrier* direduksi berdasarkan estimasi pengurangan dalam gap *complementary*.

Meskipun metode IPM dapat menyelesaikan permasalahan optimal skala besar, perhitungan numerik yang perlu dilakukan dianggap sangat sulit untuk permasalahan nonlinier. Proses ini juga memakan waktu komputasi yang lama sehingga diperlukan implementasi Predictor-Corrector IPM (PCIPM). Konsep utama metode PCIPM adalah penggabungan orde tinggi untuk keakuratan iterasi Newton dalam menyelesaikan kondisi KKT.

- **Metode *Predictor-Corrector Interior Point Method***

Turunan metode Predictor-Interior mengikuti langkah yang sama seperti metode primal dual dalam KKT persamaan (2.106). Sebelum metode iterasi Newton pada persamaan (2.106) diterapkan untuk mengestimasi suatu solusi pendekatan dari nilai $v = [x; s_1; s_2; \gamma; v_1; v_2]$, maka terlebih dahulu dapat dijabarkan sebagai berikut.

$$v + \Delta v = [x + \Delta x; s_1 + \Delta s_1; s_2 + \Delta s_2; \gamma + \Delta \gamma; v_1 + \Delta v_1; v_2 + \Delta v_2] \quad (2.107)$$

Persamaan (2.107) merupakan persamaan *central path* atau persamaan eksak untuk menyelesaikan persamaan (2.106) untuk μ^k . Dengan menyubstitusikan $(v + \Delta v)$ ke dalam v pada persamaan (2.106), maka diperoleh sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} J_H(x)^T \Delta v_2 + \nabla_x^2 L_\mu(x) \Delta x - J_F(x)^T \Delta \gamma \\ \Upsilon_1 \Delta s_1 + S_1 \Delta v_1 \\ S_2(\Delta v_1 + \Delta v_2) + (\Upsilon_1 + \Upsilon_2) \Delta s_2 \\ -J_F(x) \Delta x \\ \Delta s_1 + \Delta s_2 \\ \Delta s_2 + J_H(x) \Delta x \end{bmatrix} \quad (2.108)$$

$$= \begin{bmatrix} \nabla_x L_\mu(x) \\ S_1 v_1 \\ S_2(v_1 + v_2) \\ -F(x) \\ s_1 + s_2 + \bar{H} - \bar{H} \\ H(x) + s_2 - \bar{H} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mu^k I \\ \mu^k I \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -J_F(\Delta x)^T \Delta \gamma + J_H(\Delta x)^T \Delta v_2 \\ \Delta S_1 \Delta v_1 \\ \Delta S_2(\Delta v_1 + \Delta v_2) \\ -F^L(\Delta x) \\ 0 \\ H^L(\Delta x) \end{bmatrix}$$

$\nabla_x L_\mu(x) = D_x G(x) - J_F(\Delta x)^T \Delta \gamma + J_H(\Delta x)^T \Delta v_2$; $\Upsilon_1 := \text{diag}(v_1)$, $\Upsilon_2 := \text{diag}(v_2)$ dan $F^L(\cdot) \in \mathfrak{R}^m$, $H^L(\cdot) \in \mathfrak{R}^p$ merupakan bentuk kuadrat dari $F(\cdot)$ dan $H(\cdot)$. $\nabla_x^2 L_\mu(x) \in \mathfrak{R}^q$ menyatakan Hessian dari $L_\mu(v)$ terhadap x .

Bentuk full step Δv berasal dari persamaan (2.108) yang terdiri atas tiga komponen, yang umumnya dinyatakan sebagai berikut.

$$\Delta v = \Delta v_{\text{aff}} + \Delta v_{\text{cen}} + \Delta v_{\text{cor}} \quad (2.109)$$

Notasi Δv_{aff} , Δv_{cen} dan Δv_{cor} didefinisikan sebagai sisi pertama, kedua dan ketiga dari sisi kanan vektor. Komponen pertama Δv_{aff} merupakan *affine-scaling direction* yang diselesaikan secara iterasi Newton (untuk μ^k) bertanggung jawab untuk mereduksi fungsi objektif. Komponen kedua Δv_{cen} merupakan *centering direction* untuk menjaga penyelesaian dalam batasan daerah yang feasibel. Sedangkan komponen ketiga adalah

corrector direction digunakan untuk mengkompensasi beberapa bentuk nonlinier dalam *affine-scaling direction*.

Solusi pendekatan persamaan (2.108) diselesaikan pertama kali melalui perhitungan *Predictor Step* saat μ dropping dan bentuk sisi kanan Δ persamaan (2.108), yaitu $\Delta v = \Delta v_{off}$. Solusi pendekatan bentuk full step $\Delta v = \Delta v_{off} + \Delta v_{cen} + \Delta v_{cor}$ menggunakan nilai target untuk parameter barrier. Penyelesaiannya dibentuk dari *Predictor Step* untuk mendekati bentuk nonlinier Δ dalam sisi kanan persamaan (2.108), yang mana setelah itu variabel diperbarui dan solusi diuji untuk konvergen.

- **Locational Marginal Price (LMP)**

Penyelesaian OPF di atas secara luas dapat menggambarkan *marginal cost* yang direpresentasikan dalam LMP masing-masing node bus. Pada dasarnya, LMP merupakan faktor pengali Lagrange ρ dari persamaan aliran daya yang berasosiasi dengan daya P yang diinjeksikan, yaitu $LMP_h = \rho_{Ph}$ yang mana dapat didekati dengan kondisi optimal KKT permasalahan OPF. Notasi ρ sendiri di sini tidak tergantung pada harga *weighting factor* ω seperti dijelaskan pada referensi [1,20].

Maka dari itu, LMP untuk masing-masing bus dapat dituliskan sebagai berikut.

$$LMP_{S_i} = \rho_{P_{S_i}} = C_{S_i} + \mu_{P_{S_{max_i}}} - \mu_{P_{S_{min_i}}} \quad (2.110)$$

$$LMP_{D_i} = \rho_{P_{D_i}} = C_{D_i} + \mu_{P_{D_i}} - \mu_{P_{D_{max_i}}} - \rho_{Q_{D_i}} \tan(\varphi_{D_i}) \quad (2.111)$$

Dari persamaan (2.110) dan (2.111), kita bisa simpulkan bahwa LMP berhubungan secara langsung dengan *cost* C_S dan C_D dan tidak tergantung pada ω . LMP ini memiliki penambahan bentuk yang berasosiasi dengan λ_c sebagai representasi penambahan nilai dari solusi multi-objektif OPF.

$$LMP_{S_i} = \rho_{P_{S_i}} = C_{S_i} + \mu_{P_{S_{max_i}}} - \mu_{P_{S_{min_i}}} - \rho_{cP_{S_i}} (1 + \lambda_c + k_{G_c}) \quad (2.112)$$

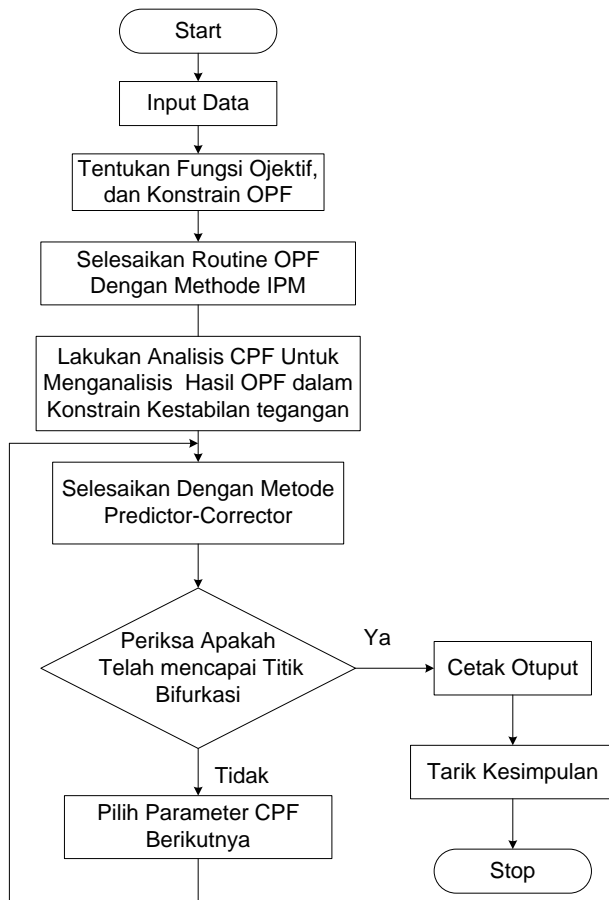
$$LMP_{D_i} = \rho_{P_{D_i}} = C_{D_i} + \mu_{P_{D_i}} - \mu_{P_{D_{max_i}}}$$

$$-\rho_{cP_{Di}}(1+\lambda_c) - \rho_{cQ_{Di}}(1+\lambda_c) \tan(\varphi_{D_i}) - \rho_{Q_{D_i}} \tan(\varphi_{D_i}) \quad (2.113)$$

Mengidentifikasi Formulasi Optimal

Prosedur-prosedur yang dilakukan adalah sebagai berikut. Pertama, data bus generator, data bus beban, dan data saluran transmisi diinput. Data saluran transmisi (R dan X) diubah ke dalam satuan per unit. Bus *swing/slack* diberi kode 1, bus generator kode 2, dan bus beban kode 0. Kedua, *Sample Plan* yang diambil di sini adalah Western System Coordinating Council (WSCC) 6 bus yang terdiri dari 1 buah *Slack* bus (GENCO2), 2 buah PV bus (GENCO1 dan GENCO3) dan 3 buah PQ bus (ESCO1, ESCO2, ESCO3) dan 10 buah saluran transmisi.

Selanjutnya, simulasi sistem disimulasikan menggunakan MATLAB PSAT/Simulink, TCSC diletakkan pada saluran 4-5. *Loading margin* pembebanan diasumsikan $\lambda_{cmin} = 0.1$ p.u untuk pembebanan minimum dan $\lambda_{cmax} = 0.8$ p.u untuk kondisi pembebanan maksimum. *Weighting factor* ω ditentukan 0.001, TCSC dioperasikan dalam *capacitive mode* dengan konstrain $X_{TCSCmin} = -0.3$ p.u dan $X_{TCSCmax} = -0.1$ p.u. Dari hasil running program aliran daya optimal menggunakan *Interior Point Method* kita akan memperoleh nilai-nilai dari *objective function*, pembebanan maksimum (*loading margin*) λ_c , suplai daya generator P_s dan *demand* daya beban P_D , tegangan V, daya reaktif optimal generator (Q), dan aliran daya optimal pada jaringan. Untuk memastikan pembebanan sistem berada dalam kondisi limit aman atau maksimum dari titik bifurkasi, hasil aliran daya optimal dianalisis menggunakan *saddle node* bifurkasi. Langkah-langkah ini dapat dipelajari melalui diagram sebagai berikut.

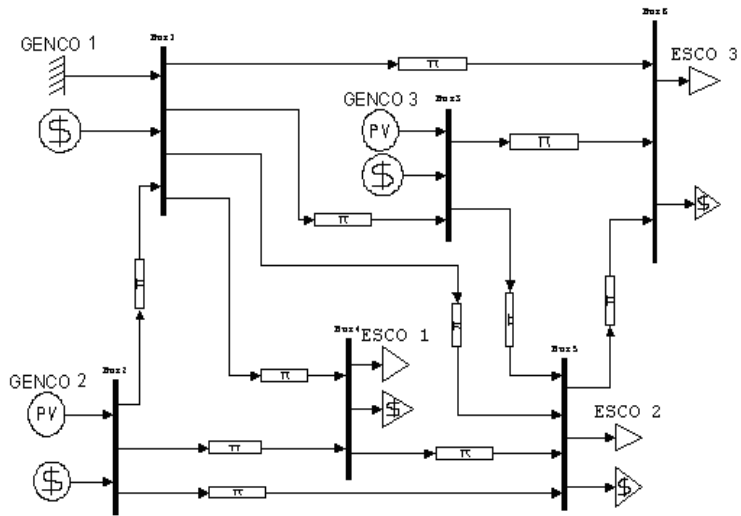


Gambar 3.12 Langkah-Langkah Penyelesaian Penelitian

Data yang digunakan adalah data sistem kelistrikan WSCC 400 kV yang terdiri dari 6 bus, 10 saluran, dan 3 pusat pembangkit. Base yang digunakan pada perhitungan adalah sebagai berikut.

- a. Base tegangan : 400 kV
- b. Base daya : 100 MVA

Single line diagram sistem WSCC 6 Bus Test Case dan data bus dapat dilihat pada gambar berikut, sementara untuk data jaringan ditunjukkan pada tabel di bawah gambar ini.



Gambar 3.13 Single line Diagram System WSCC 6 Bus Test Case

Tabel 3.1 Data Bus Sistem WSCC 6 Bus Test Case [1,20]

Participant	C[\$/MWh]	P_{max}^{bid} [MW]	P_{Lo} [MW]	Q_{Lo} [MW]	P_{Go} [MW]	P_{Glim} [MW]
GENCO 1	8.8	20	0	0	140	± 150
GENCO 2	9.7	25	0	0	90	± 150
GENCO 3	7.0	20	0	0	60	± 150
ESCO1	12.0	25	90	60	0	0
ESCO2	10.5	10	100	70	0	0
ESCO3	9.5	20	90	60	0	0

Tabel 3.2 Data Jaring Sistem WSCC 6 Bus Test Case [1,20]

Line hk	R[p.u]	X[p.u]	B[p.u]	l_{max} [p.u]
1-3	0.05	0.25	0.06	0.3082
3-6	0.02	0.1	0.02	1.3973
4-5	0.2	0.4	0.08	0.1796
3-5	0.12	0.26	0.05	0.6585
5-6	0.1	0.3	0.06	0.2
1-4	0.05	0.1	0.02	1.374
2-1	0.1	0.2	0.04	0.2591

Line hk	R[p.u]	X[p.u]	B[p.u]	I_{max} [p.u]
2-4	0.05	0.2	0.04	0.9193
2-5	0.08	0.3	0.06	0.8478
1-6	0.07	0.2	0.05	0.9147
1-5	0.1	0.3	0.04	0.7114

Daya Suplai Generator dan Demand Beban

Hasil simulasi OPF menunjukkan, bahwa suplai daya generator sebelum dan sesudah pemasangan TCSC tidak mengalami perubahan signifikan. Akan tetapi pada daya *demand* beban terjadi penambahan pada bus 6 dari 8,007 MW menjadi 8,097 MW. Jika di perhatikan, *bid losses* yang terjadi pada jaring sebelum pemasangan TCSC ialah sebesar $\sum(P_S - P_D) = (45,001 - 43,069) \text{ MW} = 1,993 \text{ MW}$ dan *bid losses* yang terjadi pada jaring setelah pemasangan TCSC adalah $\sum(P_S^* - P_D^*) = (45,001 - 43,097) \text{ MW} = 1,904 \text{ MW}$. Artinya, pemasangan TCSC telah terjadi pengurangan *losses* pada jaring sebesar 4.5 % atau dengan pemasangan TCSC, transfer daya pada jaring dapat ditingkatkan tanpa meningkatkan *losses* yang terjadi pada jaring.

Nilai fungsi multi-objektif yang diperoleh sebelum pemasangan TCSC adalah sebesar $Max \omega_1(C_D P_D - C_S P_S) - \omega_2 \lambda_c = Max (1 - 0.001).((([25 \times 12] + [10 \times 10,5] + [8,008 \times 9,5]) - ([25 \times 8,8] + [0,001 \times 9,7] + [20 \times 7])) + (0.001 \times 0,515)) = 120.945 \text{ \$/h}$.

Dan nilai fungsi multi-objektif yang diperoleh setelah pemasangan TCSC adalah $Max \omega_1(C_D P_D - C_S P_S) + \omega_2 \lambda_c = Max (1 - 0.001).((([25 \times 12] + [10 \times 10,5] + [8,096 \times 9,5]) - ([25 \times 8,8] + [0,001 \times 9,7] + [20 \times 7])) + (0.001 \times 0,547)) = 121.786 \text{ \$/h}$.

Tabel 3.3 OPF Daya Suplai dan Daya *Demand* Beban

Bus	POWER SUPPLIES			
	Ps min [MW]	Ps [MW]	Ps* [MW]	Ps max [MW]
Bus1	0,001	25	25	25
Bus2	0,001	0,001	0,001	20
Bus3	0,001	20	20	20
Bus	POWER DEMANDS			
	Pd min [MW]	Pd [MW]	Pd* [MW]	Pd max [MW]
Bus4	0,001	25	25	25
Bus5	0,001	10	10	10
Bus6	0,001	8,008	8,096	20

Ps*, Pd* adalah daya suplai dan daya *demand* setelah pemasangan TCSC

Social benefit dari sistem yang diperoleh sebelum pemasangan TCSC yakni sebesar $\varpi_1(\sum_i C_{Di}(P_{Di}) - \sum_i C_{Si}(P_{Si})) = (1 - 0.001) \cdot (([25 \times 12] + [10 \times 10,5] + [8,008 \times 9,5]) - ([25 \times 8,8] + [0,001 \times 9,7] + [20 \times 7])) = 120.944$ \$/h dan nilai *social benefit* sistem yang diperoleh setelah pemasangan TCSC adalah sebesar $\varpi_1(\sum_i C_{Di}(P_{Di}) - \sum_i C_{Si}(P_{Si})) = (1 - 0.001) \cdot (([25 \times 12] + [10 \times 10,5] + [8,096 \times 9,5]) - ([25 \times 8,8] + [0,001 \times 9,7] + [20 \times 7])) = 121.785$ \$/h.

Dari perhitungan di atas, kita bisa katakan bahwa terjadi peningkatan nilai fungsi multi-objektif sistem setelah pemasangan TCSC. Kondisi ini terjadi karena peningkatan total *demand* dari 43.008 MW menjadi 43.096 MW dan batasan pembeban sistem atau *loading margin* (λ).

Tegangan Sistem

Dari tabel 4.2 dapat dilihat hasil simulasi OPF untuk masing-masing tegangan bus ditunjukkan bahwa setelah pemasangan TCSC tidak terjadi perubahan tegangan pada bus sistem kecuali suatu peningkatan tegangan

pada bus 5 dari 1,01 p.u menjadi 1,02 p.u. Sisi lain yang dapat dilihat dari tabel 4.2 setelah pemasangan TCSC adalah terjadi perubahan sudut fasa tegangan. Hal ini terjadi karena adanya perubahan reaktansi jaring yang diakibatkan oleh modifikasi reaktansi TCSC dalam jaring sehingga dalam solusi matriks Jacobian aliran daya mengakibatkan perubahan sudut fasa dan daya pada masing – masing bus. Dari tabel 4.2 dapat juga dilihat bahwa tegangan bus sistem sebelum dan setelah pemasangan TCSC berada dalam nilai limit yang telah ditentukan.

Daya pada Masing-Masing Bus

Tabel 3.4 OPF Tegangan Sistem

Bus	V min [p.u.]	Tanpa TCSC		Dengan TCSC		V max [p.u.]
		V [p.u.]	phase [rad]	V [p.u.]	phase [rad]	
Bus1	0,9	1,1	0	1,10	0	1,1
Bus2	0,9	1,1	0,014	1,10	0,014	1,1
Bus3	0,9	1,1	-0,025	1,10	-0,027	1,1
Bus4	0,9	1,02	-0,051	1,02	-0,050	1,1
Bus5	0,9	1,01	-0,073	1,02	-0,078	1,1
Bus6	0,9	1,04	-0,067	1,04	-0,069	1,1

Tabel di atas merupakan data hasil OPF daya, LMP dan Pay pada masing-masing bus. Dalam hal ini, setelah pemasangan TCSC terjadi peningkatan daya aktif pada bus 1 dari 164, 875 MW menjadi 164, 979MW dan pada bus 6 dari 98, 069 MW menjadi 98, 158 MW.

Daya reaktif juga menunjukkan, bahwa setelah pemasangan TCSC, terjadi perubahan seperti pada bus 1 dari 76,206 MVar menjadi 77,6369 MVar, pada bus 2 dari 44,6233 MVar menjadi 44,658 MVar, pada bus 3 dari 72,0844 MVar menjadi 70,6799 MVar, pada bus 4 dari 62, 69 MVar menjadi 62,719 MVar.

Sementara untuk LMP masing-masing bus setelah pemasangan TCSC tidak terlalu mengalami perubahan signifikan. Artinya, biaya Pay untuk masing-masing bus merupakan hasil kali antara daya aktif masing-masing bus dengan LMP masing-masing bus.

Tabel 3.5 OPF Daya, LMP, dan Pay

Bus	Tanpa TCSC			
	P [MW]	Q [MVar]	LMP [\$/MWh]	Pay [\$/h]
Bus1	164,875	77,192	8,8989	-1467
Bus2	90,001	44,774	8,9385	-804
Bus3	80	73,859	9,0621	-725
Bus4	-115	-76,665	9,4762	1090
Bus5	-110	-77,000	9,5663	1052
Bus6	-98,008	-65,338	9,3434	916
Bus	Dengan TCSC			
	P [MW]	Q [MVar]	LMP [\$/MWh]	Pay [\$/h]
Bus1	164,979	78,608	8,9024	-1469
Bus2	90,001	44,804	8,9376	-804
Bus3	80	72,512	9,0622	-725
Bus4	-115	-76,665	9,4725	1089
Bus5	-110	-77	9,5684	1053
Bus6	-98,097	-65,398	9,3449	917

Biaya daya aktif total yang diterima generator bus sebelum pemasangan TCSC adalah $(1467 + 804 + 725) \text{ \$/MW} = 2996 \text{ \$/MWh}$, lalu setelah pemasangan TCSC menjadi $(1469 + 804 + 725) \text{ \$/MW} = 2998 \text{ \$/MW}$. Kemudian biaya total pemakaian daya aktif yang dikeluarkan *load bus* sebelum pemasangan TCSC adalah $(1090 + 1052 + 916) = 3058 \text{ \$/MW}$ setelah pemasangan TCSC menjadi $(1089 + 1053 + 917) \text{ \$/MWh} = 3059 \text{ \$/MWh}$. Artinya, setelah pemasangan TCSC, ternyata pembangkit dapat meningkatkan keuntungan daya aktif akibat adanya peningkatan daya aktif *demand*. Maka dari itu dapat disintesis, bahwa biaya yang diperoleh oleh operator pasar bebas sistem tenaga listrik atau *Independent Market Operator* (IMO) sebelum pemasangan TCSC adalah sebesar $(3084 - 3021) \text{ \$/MWh} = 63 \text{ \$/MWh}$ dan setelah pemasangan TCSC adalah sebesar $(3084 - 3023) \text{ \$/MWh} = 61 \text{ \$/MWh}$.

Tegangan Kritis dan Daya Kritis Sistem

Dua tabel yakni tentang OPF tegangan dan daya kritis sistem menunjukkan, bahwa dua parameter ini ditentukan berdasarkan pembebanan λ (*loading margin*) maksimum sistem seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut ini.

Tabel 3.6 OPF parameter pembebanan sistem

λ min [p.u.]	Tanpa TCSC	Dengan TCSC	λ max [p.u.]
	λ [p.u.]	λ [p.u.]	
0,1	0,515	0,547	0,8

Sebelum pemasangan TCSC batas pembebanan maksimum sistem adalah sebesar 0.516 p.u, namun setelah pemasangan TCSC batas pembebanan sistem dapat ditingkatkan menjadi 0.547 p.u. Artinya, setelah pemasangan TCSC batas aman pembebanan sistem dapat diperbesar menjadi 5,7 % dari pembebanan maksimum sebelum pemasangan TCSC.

Tabel 3.7 OPF Tegangan Kritis Sistem

Bus	V min [p.u.]	Tanpa TCSC		Dengan TCSC		V max [p.u.]
		Vc [p.u.]	phase [rad]	Vc [p.u.]	phase [rad]	
Bus1	0,9	1,07	0,00	1,07	0,00	1,1
Bus2	0,9	1,10	0,01	1,10	0,01	1,1
Bus3	0,9	1,09	-0,05	1,08	-0,05	1,1
Bus4	0,9	0,94	-0,09	0,94	-0,08	1,1
Bus5	0,9	0,93	-0,13	0,92	-0,14	1,1
Bus6	0,9	0,98	-0,12	0,97	-0,12	1,1

Berdasarkan efek pembebanan maksimum ini, maka dapat kita lihat bahwa pada tegangan sistem seperti yang ditunjukkan pada data tegangan kritis sistem. Artinya, terdapat perubahan penurunan pada tegangan sistem tidak terlalu signifikan.

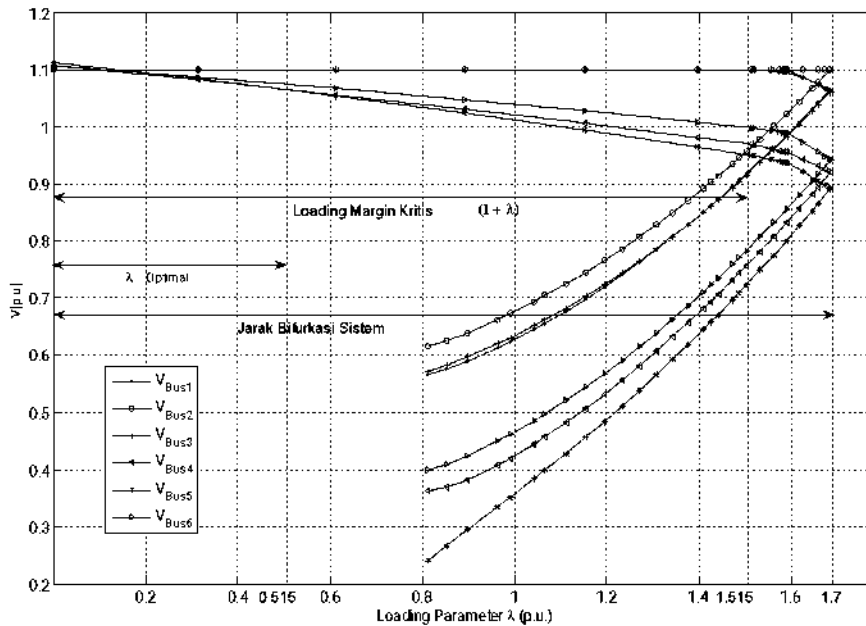
Selain itu, kondisi total pembebanan maksimum (MLC) sebelum pemasangan TCSC tercatat $\Sigma P_{lc} = (174.19 + 166.62 + 148.62) \text{ MW} = 489.43 \text{ MW}$ dan kondisi total kemampuan pembebanan sistem yang ada (ALC) sebelum pemasangan TCSC adalah $\lambda \cdot \Sigma P_l = 0.515 \times 323.008 \text{ MW} = 166 \text{ MW}$. Sedangkan untuk kondisi total pembebanan maksimum (MLC) setelah pemasangan TCSC adalah $\Sigma P_{lc} = (177.92 + 170.18 + 151.86) \text{ MW} = 499.96 \text{ MW}$ dan kondisi total kemampuan pembebanan sistem yang ada (ALC) setelah pemasangan TCSC adalah $\lambda \cdot \Sigma P_l = 0.547 \times 323.008 \text{ MW} = 176.7 \text{ MW}$.

Tabel 3.8 OPF Daya Kritis Sistem

Bus	Tanpa TCSC		Dengan TCSC	
	Pc [MW]	Qc [MVar]	Pc [MW]	Qc [MVar]
Bus1	257,24	98,195	263,294	108,448
Bus2	140,42	126,196	143,635	127,947
Bus3	124,82	149,998	127,673	149,93
Bus4	-174,19	-116,26	-177,92	-118,61
Bus5	-166,62	-116,77	-170,18	-119,13
Bus6	-148,45	-95,066	-151,86	-97,034

Melalui pendekatan analisis CPF, fenomena dari pembebanan maksimum dapat ditinjau sehingga kita bisa mengetahui seberapa jauh ALC dan MLC masing-masing bus dari titik bifurkasi sistem.

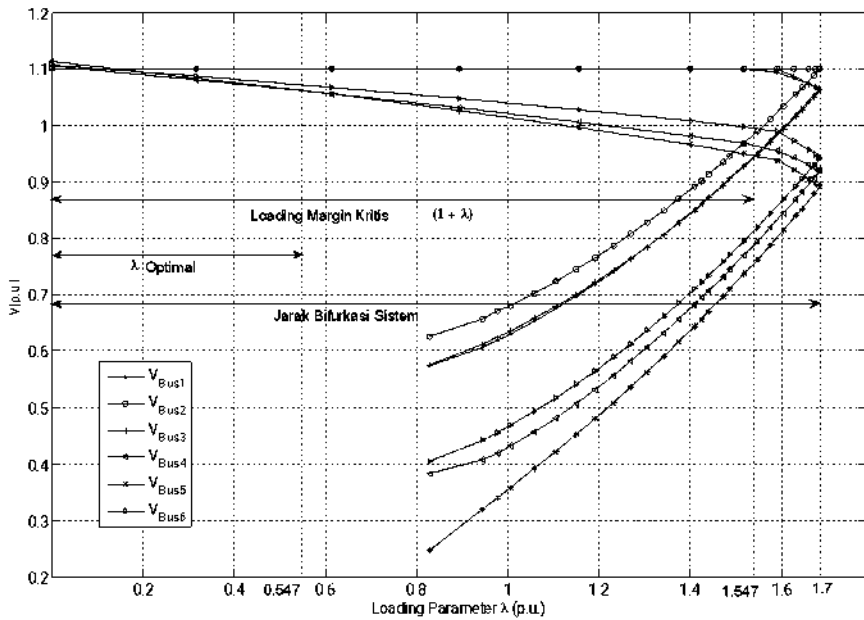
Jarak maksimum keamanan pembebanan sistem sebelum pemasangan TCSC dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Terlihat, bahwa jarak λ optimal (*optimal loading margin* λ) dengan titik bifurkasi sistem adalah sebesar $[1,7 - 0,515]$ p.u = 1,185 p.u, dan jarak pembebanan kritis dengan titik bifurkasi adalah sebesar $[1,7 - 1,515]$ p.u = 0,185 p.u



Gambar 3.14 Profil Tegangan Sistem terhadap Pembebanan Tanpa TCSC.

Jarak maksimum keamanan pembebanan sistem setelah pemasangan TCSC dapat dilihat pada gambar di bawah ini, di mana jarak λ optimal (optimal *loading margin* λ) dengan titik bifurkasi sistem adalah sebesar $[1,7 - 0,547]$ p. u = 1,153 p.u, sedangkan jarak pembebanan kritis dengan titik bifurkasi adalah sebesar $[1,7 - 1,547]$ p.u = 0,153 p.u.

Dengan pendekatan analisis CPF di atas, maka dapat dikatakan bahwa λ yang dihasilkan dari analisis OPF tanpa dan dengan pemasangan TCSC masih berada dalam batas pembebanan yang aman.



Gambar 3.15 Profil Tegangan Sistem terhadap Pembebanan Menggunakan TCSC.

Termal Jaring

Aspek lainnya yang perlu diperhatikan ialah level termal jaring. Aspek ini dapat dinyatakan dengan aliran arus pada jaring saat terjadi pembebanan optimal dan pembebanan kritis sebelum dan setelah pemasangan TCSC.

Dua tabel di bawah ini merupakan kondisi level termal jaring sebelum pemasangan TCSC dan kondisi level termal jaring setelah pemasangan TCSC. Dari dua kondisi tersebut kita bisa katakan bahwa level termal jaring yang terjadi saat pembebanan optimal dan pembebanan kritis masih berada di bawah limit level termal jaring tersebut.

Tabel 3.9 OPF Aliran Arus pada Jaringan Tanpa TCSC

Bus l	Bus j	I_{ij} [p.u.]	$I_{ij c}$ [p.u.]	I_{ji} [p.u.]	$I_{ji c}$ [p.u.]	$I_{ij max}$ [p.u.]
Bus1	Bus3	0,117	0,223	0,104	0,191	0,3082
Bus3	Bus6	0,741	1,274	0,755	1,289	1,3973
Bus4	Bus5	0,072	0,093	0,064	0,091	0,1796
Bus3	Bus5	0,338	0,597	0,368	0,628	0,6585
Bus5	Bus6	0,112	0,175	0,061	0,127	0,2
Bus1	Bus4	0,848	1,365	0,858	1,374	1,374
Bus2	Bus1	0,081	0,141	0,062	0,173	0,2591
Bus2	Bus4	0,494	0,891	0,519	0,919	0,9193
Bus2	Bus5	0,393	0,691	0,423	0,727	0,8478
Bus1	Bus6	0,435	0,698	0,454	0,714	0,9147
Bus1	Bus5	0,357	0,583	0,379	0,603	0,7114

Tabel 3.10 OPF Aliran Arus pada Jaringan dengan TCSC

Bus i	Bus j	I_{ij} [p.u.]	$I_{ij c}$ [p.u.]	I_{ji} [p.u.]	$I_{ji c}$ [p.u.]	$I_{ij max}$ [p.u.]
Bus1	Bus3	0,125	0,230	0,113	0,203	0,3082
Bus3	Bus6	0,739	1,299	0,753	1,314	1,3973
Bus4	Bus5	1,40E-13	5,60E-11	0,082	0,074	0,1796
Bus3	Bus5	0,340	0,618	0,368	0,648	0,6585
Bus5	Bus6	0,108	0,181	0,062	0,136	0,2
Bus1	Bus4	0,835	1,364	0,847	1,374	1,374
Bus2	Bus1	0,083	0,139	0,064	0,169	0,2591
Bus2	Bus4	0,485	0,891	0,511	0,919	0,9193
Bus2	Bus5	0,404	0,730	0,432	0,765	0,8478
Bus1	Bus6	0,443	0,734	0,461	0,752	0,9147
Bus1	Bus5	0,366	0,622	0,386	0,641	0,7114

Ternyata, kondisi level termal jaringan setelah pemasangan TCSC mengakibatkan peningkatan level termal pada jaringan. TCSC yang diletakkan antara bus 4 dan 5 memberikan efek termal untuk arah aliran dari bus 4 ke bus 5 yakni sebesar 1,40E-13 p.u untuk kondisi optimal dan 5,60E-11 p.u untuk kondisi kritis. Akan tetapi sebaliknya, untuk arah aliran dari bus 5 ke bus 4 kondisi level termal jaringan antara bus 5 dan 4 adalah

0,082 p.u untuk kondisi optimal dan 0,074 p.u untuk kondisi pembebanan kritis.

Intisari

Pada intinya, nilai fungsi multi-objektif sistem sebelum pemasangan TCSC yakni sebesar 120,8 \$/h, dan menjadi 121,9 \$/h setelah pemasangan TCSC. Artinya, setelah pemasangan TCSC *social benefit* yang diperoleh menjadi lebih besar. *Bid losses* daya aktif yang dihasilkan sebelum pemasangan TCSC 1,993 MW menjadi turun setelah pemasangan TCSC hingga 1,904 MW. Selain itu, Parameter pembebanan λ (*loading margin*) mengalami peningkatan dari 0,515 p.u sebelum pemasangan TCSC menjadi 0,547 p.u setelah pemasangan TCSC

Setelah pemasangan TCSC, profil tegangan juga dapat diperbaiki walaupun terjadi peningkatan *demand* khususnya pada bus 5 dari 1,01 p.u menjadi 1,02 p.u. Sebelum pemasangan TCSC sendiri permintaan *demand* tercatat sebesar 43.008 MW dengan kemampuan pembebanan sistem ALC hingga 166 MW dan MLC sebesar 489.43 MW. Setelah pemasangan TCSC, *demand* dapat ditingkatkan sebesar 43.096 MW tanpa menambah suplai daya dengan kemampuan pembebanan sistem ALC hingga 176.6 MW dan MLC sebesar 499.96 MW.

Dari pendekatan analisis CPF, ternyata parameter pembebanan λ (*loading margin*) yang dihasilkan masih berada di dalam limit aman pembebanan. Atau dalam hal ini dapat dinyatakan, bahwa λ yang dihasilkan melalui analisis multi-objektif OPF masih jauh dari titik bifurkasi sistem. Sementara untuk efek termal jaring yang dihasilkan akibat pembebanan optimal dan kritis setelah pemasangan TCSC masih berada dalam limit yang aman.

Tidak terlepas dari keterbatasan bab ini, penulis berharap agar memungkinkan untuk dilakukan riset dan pengembangan lebih lanjut dalam sistem pasar bebas sistem tenaga listrik. Dalam hal ini, fokus diutamakan pada perdagangan tenaga listrik antar area dalam multi waktu dan multi *FACTS Devices* yang berbeda. Dengan begitu, kita dapat memperoleh solusi multi kombinasi penyelesaian aliran daya optimal

yang dapat menjamin kestabilan sistem sekaligus biaya optimal untuk masing-masing bus dan jaring antar area tersebut.

Referensi

- [1] Arthit Sode-Yome, Nadarajah M, K.Y Lee, *A Maximum Loading margin Method for Static Voltage Stability in Power System*, IEEE Trans. On Power System, Vol.21, No.2, May 2006
- [2] C.A Canizares, F.L Alvarado, *Point of Collapse And Continuation Methods For Large AC/DC System*, IEEE Trans. On Power System, Vol.8, 1993
- [3] Christian Schaffner, *Valuation of Controllable Devices in Liberalized Electricity Markets*, Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, 2004
- [4] Claudio A. Canizares, *Application of Optimization to Voltage Collapse Analysis*, IEEE/PES Summer Meeting, 1988
- [5] Claudio A. Canizares, *Calculating Optimal System Parameters To Maximize The Distance To Saddle-Node Bifurcations*, IEEE Transaction On Circuits and System, Vol. I, 1997
- [6] Claudio A. Canizares, *Condition For Saddle-Node Bifurcations in AC/DC Power System*, International Journal of Electrical & Energy System, Vol. 17, 1995.
- [7] Enrique Acha, et al., *FACTS Modelling and Simulation in Power Network*, Jhon Wiley & Son Ltd, England. 2004
- [8] F. Milano, C.A Canizares, *Multi-Objective Optimization for Pricing System Security in Electricity Markets*, IEEE Trans. on Power System, March 2002
- [9] Federico Milano, *Documentation for Power System Analysis Toolbox (PSAT) Ver1.3.4*, <http://power.uwaterloo.ca>
- [10] Federico Milano, *Pricing System Security in Electricity Market Models with Inclusion of Voltage Stability Constraints*, Thesis, University of Genova Italy, 2003
- [11] Firmansyah, Ontoseno P, *Model dan Analisis Aliran Daya Optimal (OPF) Menggunakan PSAT-MATLAB/Simulink*, SITIA ITS, Mei 2005

- [12] Gabriella Glanzmann, *Flexible Alternating Current Transmission Systems*, ETH Zurich, EEH Power System Laboratory, 2005
- [13] Garng M. Huang, N. Kumar, C. Nair, *Incorporating TCSC into the Voltage Stability Constrained OPF Formulation*, PSERC 2002, <http://www.pserc.org>
- [14] H.D Chiang, K.S Shah, N. Balu, *CPFLOW: A Practical Tool for Tracing Power System Steady-state Stationary Behavior Due to Load and Generation Variations*, IEEE Trans. On Power System, Vol.10, 1995
- [15] Hadi Saadat, *Power System Analysis*, McGraw Hill inc, 1991
- [16] M. Noorian, L. Angquist, M.Ghandari, G. Anderson, *Improving Power System Dynamics By Series-Connected FACTS Devices*, IEEE Transaction on Power Delivery, 1997
- [17] Martin Geidl, *Implementation of FACTS and Economic Generation Dispatch in an Interactive Power Flow Simulation Platform*, Thesis, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich, 2003
- [18] Murat F, F.L Alvarado, *Using TCSC devices for Optimal Economic Dispatch*, University of Wisconsin-Madison, Department of Electrical and Computer Engineering.
- [19] Praba Kundur, *Power System Stability and Control*, EPRI, McGraw Hill inc., 1994
- [20] Tina Orfanogianni, *A Flexible Software Environment For Steady-state Power Flow Optimization With Series FACTS Devices*, Thesis, Eidgenossische Technische Hochschule Zurich, 2000
- [21] W. Rosehart, C.A Canizares, *Multi-Objective Optimal Power Flow to Evaluate Voltage Scurity Cost in Power Networks*, IEEE Trans. On Power System, March 2001
- [22] Wiliam D. Rosehart, Claudio A. Canizares, *Bifurcation Analysis of Various Power System Models*, Department of Electrical and Computer Engineering, Waterloo University.
- [23] William D. Rosehart, *Optimization of Power System with Voltage Security Constrain*, Thesis, University of Waterloo Canada, 2000

Bagian 4

Memilih Lokasi *Static VAR Compensator (Svc)* untuk Perbaikan Keamanan *Voltage Collapse* dengan *Genetic Algorithms*

Safrizal, ST, MT

Safrizal27@unisnu.ac.id

Energi listrik yang dibangkitkan dari pusat-pusat pembangkit tenaga listrik (*Electric Power Station*) akan didistribusikan ke pusat-pusat beban (*Load Centers*). Upaya ini dilakukan melalui jaringan transmisi, subtransmisi dan distribusi, saluran distribusi yang digunakan, baik saluran udara (*Over head Line*) maupun saluran kabel bawah tanah (*Under Ground Line*).

Kebutuhan energi listrik semakin hari semakin tinggi, dan ini berlaku di berbagai sektor, seperti industri-industri, bangunan komersial, rumah tangga dan lain sebagainya. Terutama ketika beban puncak (*Peak Loading*) yang umumnya merupakan beban-beban linear dan non-linear dengan harmonisa periodik, serta non-periodik, dan juga berbagai rating kapasitas daya dalam jumlah besar dengan jarak beban yang jauh. Kondisi ini merupakan salah satu penyebab ketidakstabilan tegangan sistem (*Voltage instability*) tenaga listrik

Bagian ini akan membahas tentang pemanfaatan **FACTS Device** (*Flexible AC Transmission System*), yakni jenis *Static VAR Compensator (SVC)* untuk mengatur kestabilan tegangan (*Voltage Stability*) [1]. Pemasangan SVC di lokasi (*Load bus*) dan rating daya yang optimal menggunakan metode *Genetic Algorithm* (GA) diharapkan mampu menghindari terjadi *Voltage Collapse* sekaligus meningkatkan performansi mutu tegangan (*Voltage Quality*) dan mutu daya (*Power Quality*) dari keseluruhan sistem interkoneksi saluran transmisi tenaga listrik.

Penggunaan daya reaktif oleh komponen-komponen sistem dan beban mampu mengakibatkan susut tegangan (*Voltage droop*), faktor daya yang rendah sepanjang jaringan, panas (*Calor*) di sekeliling kawat penghantar. Semua ini berpengaruh terhadap berkurangnya kemampuan penyaluran daya oleh pembangkit listrik.

Peningkatan daya listrik yang disalurkan dari sisi pengiriman (*Voltage Sending*), ke sisi terima (*Voltage Reseiving*), terutama pada jaringan transmisi yang panjang memiliki dampak negatif terhadap naik tegangan (*Over Voltage*) pada sisi beban yang paling dekat dengan pusat pembangkit. Begitu pula sebaliknya, berpotensi terjadi penurunan tegangan (*Droop Voltage*) pada ujung jaringan transmisi, normal (0,95-1,05 pu) [2].

Peningkatan pemakaian daya listrik yang terus bertambah (**terutama beban bersifat induktif**) di suatu *feeder* (*Bulk Station*) akan menyebabkan penurunan tegangan dan frekuensi. Jika ini tidak direspons dengan cepat, maka tidak hanya berdampak pada *feeder* tersebut, tetapi secara bersamaan juga akan merambat terhadap turunnya tegangan pada *feeder* lain. Artinya, terjadi peristiwa penurunan tegangan secara simultan (*Voltage Collpase Phanomena*) pada suatu regional sistem tenaga listrik [3].

Penyebab *Voltage Collapse permanent* ialah dua gangguan besar seperti *off generator* (*generators outage*) dan *off line* (*line outage*). Sementara penyebab *Voltage Collapse temporer* adalah beban berat (*high heavily*) yang bersifat induktif pada sistem tenaga listrik di suatu jaringan transmisi yang panjang [3]. Kondisi ini dapat diatasi dengan penyediaan daya reaktif oleh kompensator (*FACTS Device*).

Perlu dipahami bahwa bahasan kali ini memiliki beberapa batasan. Pertama, penentuan titik kritis nilai tegangan pada bus beban (*PQ Bus*) dilakukan perhitungan studi aliran daya menggunakan metode Newton Rapson. Selain itu, penentuan lokasi dan kapasitas rating *FACTS Device* tipe *Static VAR Compensator* (*SVC*) dilakukan menggunakan metode *Genetic Algorithms* (*GA*). Model generator memakai 2 (dua) Axis, model *exciter* linear 1 orde, model jaringan linear dan beban statis. Terakhir,

fungsi optimasi di sini adalah meminimasi *cost* investasi *FACTS Device* yang paling minimal.

Dalam menganalisis kestabilan tegangan untuk mengetahui kemungkinan *Voltage Collapse* akibat pembebanan pada setiap bus dilakukan simulasi menggunakan program Power World dan MATLAB. Hasil simulasi akan digunakan untuk mengetahui lokasi penempatan SVC dengan memperhitungkan investasi minimalnya.

FACTS Device sudah pernah diterapkan dengan hanya menggunakan batasan teknis yaitu batas kestabilan tegangan pada bus beban terhadap *Voltage Collapse* dan batas kelayakan tegangan terhadap beban yang diizinkan. Kekurangan metode ini ialah tidak memperhitungkan segi ekonomis. Melalui bahasan ini, penulis berusaha memperhitungkan parameter biaya investasi dari pada SVC sekaligus lokasi yang digunakan.

Kestabilan Tegangan pada Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan kemampuan sistem tenaga listrik atau bagian komponennya dalam mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan sistem. Kestabilan tegangan dikenal dengan kestabilan beban (*load stability*). Dalam keadaan operasional yang stabil dari sistem tenaga listrik, terdapat keseimbangan antara daya input mekanis pada penggerak mula (*prime mover*) dengan daya *output* listrik pada sistem. Faktor utama penyebab ketidakstabilan ialah ketidakmampuan sistem untuk memenuhi permintaan daya reaktif pada kondisi beban sistem yang terlalu berat.

Faktor lain yang berkontribusi terhadap kestabilan tegangan adalah batas pembangkitan daya reaktif generator, karakteristik beban, karakteristik peralatan kompensasi daya reaktif dan aksi dari peralatan pengontrol tegangan. Karakteristik reaktif saluran transmisi, transformator, membatasi transfer daya maksimum ke beban. Sistem tenaga kurang mampu dalam mentransfer daya reaktif melalui saluran transmisi yang sangat panjang mengingat rugi-rugi daya yang semakin

membesar. Peningkatan dinamik terhadap pemakaian atau pelepasan secara simultan kebutuhan daya reaktif beban sistem, dalam rating daya yang besar (*heavy loading*) merupakan penyebab fluktuasi tegangan dan frekuensi sistem. Fluktuasi tegangan yang melewati konstrain (0,95-1,05 pu) juga mampu mempengaruhi *instability* tegangan sistem.

Instability tegangan sistem disebabkan oleh *over load* yang bersifat induktif dan berkurangnya kemampuan suplai daya reaktif. Kondisi ini pada akhirnya akan menempatkan sistem dalam keadaan *Voltage Collapse* dan kemungkinan terburuknya yaitu terjadi *blackouts*. Karena keterbatasan kemampuan jaringan transmisi dalam menyuplai daya reaktif ke beban, maka dibutuhkan peralatan untuk kendali level tegangan [18] sebagai berikut.

1. FACTS Device
2. Under-load tap Charging (ULTC) transformers.
3. Generator.

Analisis Kestabilan Tegangan

Transmisi daya reaktif, di mana daya total transmisi dapat dituliskan sebagai berikut [19].

$$\begin{aligned}
 S_r &= P_r + jQ_r = E_r I \\
 &= E_r \left[\frac{E_s \cos \delta + jE_s \sin \delta - E_r}{jX} \right] \\
 &= \frac{E_s E_r}{X} \sin \delta + j \left[\frac{E_s E_r \cos \delta - E_r^2}{X} \right] \\
 P_r &= \frac{E_s E_r}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (2.1)
 \end{aligned}$$

$$Q_r = \left[\frac{E_s E_r \cos \delta - E_r^2}{X} \right] \quad (2.2)$$

dan pada sisi kirim

$$P_s = \frac{E_s E_r}{X} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (2.3)$$

$$Q_s = \frac{E_s^2 - E_s E_r \cos \delta}{X} \quad (2.4)$$

dengan menganggap $\cos \delta = 1$, maka,

$$Q_s = \frac{E_r (E_s - E_r)}{X} \quad (2.5)$$

$$Q_r = \frac{E_s (E_s - E_r)}{X} \quad (2.6)$$

Persamaan-persamaan tersebut menunjukkan, bahwa transmisi daya reaktif bergantung sepenuhnya pada magnitudo tegangan dan mengalir dari tegangan yang lebih tinggi ke tegangan yang lebih rendah. Sementara daya nyata atau aktif bergantung sepenuhnya pada sudut daya.

Daya reaktif tidak bisa ditransmisikan melalui sudut daya yang besar meskipun terdapat magnitudo tegangan yang cukup. Kebutuhan akan variasi magnitudo tegangan kurang lebih 5% dianggap mampu menyebabkan beberapa kesulitan. Berbeda dengan transfer daya nyata, daya reaktif tidak dapat ditransmisikan melalui jarak yang sangat panjang.

Terdapat beberapa alasan untuk meminimalisasi transfer daya reaktif. Rugi daya nyata harus diminimalisasi untuk alasan ekonomi. Begitu juga rugi reaktif harus diminimalkan dalam rangka mengurangi investasi pada perangkat daya reaktif semacam kapasitor *shunt*. Rugi-rugi sepanjang impedansi seri pada saluran transmisi adalah $I^2 R$ dan $I^2 X$. Untuk I^2 sendiri dapat ditulis sebagai berikut.

$$I^2 = I I^* = [P - jQ/V^*][P + jQ/V] = P^2 + Q^2/V^2$$

dan

$$P_{rugi} = I^2 R = P^2 + Q^2/V^2 R \quad (2.7)$$

$$Q_{\text{rugi}} = I^2 X = P^2 + Q^2 / V^2 X \quad (2.8)$$

Agar rugi dapat diminimalisasi, transfer daya reaktif harus dikurangi. Tegangan juga harus dijaga agar tetap tinggi. Menjaga tegangan tetap tinggi menjadi bagian dari upaya untuk meminimalkan rugi reaktif sehingga tegangan tetap stabil.

Upaya minimalisasi *overvoltage* temporer akibat pelepasan beban juga menjadi alasan untuk meminimalisasi transfer daya reaktif. Kasus yang paling sering ditemukan ialah terbukanya circuit breaker dengan saluran transmisi masih beroperasi.

Tegangan thevenin dapat didefinisikan sebagai berikut.

$$E_{th} \angle \delta = V \angle 0 + jXI = V + jX \frac{P_r - jQ_r}{V} = V + \frac{XQ_r}{V} + j \frac{XP_r}{V} \quad (2.9)$$

Dari persamaan tersebut dan juga diagram fasor, tampak bahwa kenaikan tegangan yang sefasa dengan V bergantung pada Q . Kondisi ini menentukan nilai E_{th} , sedangkan sudut δ bergantung sepenuhnya pada P .

Kondisi yang terbaik ialah daya reaktif yang harus dibangkitkan dekat dengan titik konsumen. Beberapa alasan untuk meminimalisasi transfer daya reaktif antara lain sebagai berikut.

1. Tidak efisien selama transfer daya nyata yang tinggi dan membutuhkan gradien magnitude tegangan substansial.
2. Dapat menyebabkan rugi daya aktif dan reaktif.
3. Dapat menyebabkan tegangan lebih yang merusak jika terjadi pelepasan beban secara tiba-tiba.
4. Memerlukan perlengkapan yang lebih besar untuk transformator dan kabel.

Jangka Waktu Ketidakstabilan Tegangan

Ketidakstabilan tegangan memiliki jangka waktu dari beberapa mili detik hingga belasan menit. Berikut merupakan klasifikasi dari dua macam ketidakstabilan tegangan, yang dibagi menjadi tiga skenario sebagai berikut.

1. Skenario 1, di mana stabilitas tegangan *transient*. Jangka waktunya adalah nol hingga sepuluh detik yang merupakan jangka waktu stabilitas *transient* sudut rotor. Tegangan kolaps (*Voltage Collapse*) disebabkan oleh aksi cepat komponen beban yang tidak diharapkan seperti motor induksi dan konverter DC. Di beberapa macam kedip tegangan, kebutuhan akan daya reaktif pada motor induksi meningkat, di mana hal inilah yang menyebabkan terjadinya tegangan kolaps.
2. Skenario 2 ialah stabilitas tegangan *mid-term*. Jangka waktu yang dibutuhkan ialah beberapa menit, yakni dua hingga tiga menit. Skenario ini melibatkan beban besar, transfer daya besar dari generator dan gangguan besar yang terjadi tiba-tiba. Sistem ini stabil secara *transient* sebab sensitivitas tegangan terhadap beban. Gangguan lepasnya transfer daya dari salah satu generator (*generator outage*) atau lepasnya saluran utama transmisi (*transmission line outage*) menyebabkan rugi-rugi daya reaktif yang cukup besar dan tegangan *sags* pada daerah beban. Tap *changer* pada LTC transformer regulator tegangan peka terhadap tegangan rendah dan akan beraksi untuk memperbaiki tegangan distribusi. Pemulihan beban menjadi penyebab *sags* pada tegangan transmisi yang lebih jauh lagi. Generator terdekat akan mengalami eksitasi dan beban berlebih, namun pembatas eksitasi berlebih akan mengembalikan arus medan ke harga awal. Generator harus menyediakan daya reaktif. Sistem pembangkitan dan transmisi tidak lagi mampu *men-support* beban dan daya reaktif. Cacat tegangan akan terjadi dan menyebabkan tegangan kolaps sebagian atau seluruhnya. Kondisi ini dipengaruhi oleh jenis beban (*characteristic loading*).
3. Skenario 3 ialah ketidakstabilan tegangan *longer-term*. Ketidakstabilan dalam jangka waktu yang lama akan dipengaruhi oleh kenaikan beban yang sangat besar (pagi atau siang hari), atau kenaikan transfer daya. Kenaikan beban dalam megawatt/menit, dapat meningkat sangat cepat. Maka dari itu, di sini kita

memerlukan tindakan operator untuk mengoperasikan perlengkapan daya reaktif atau *load shedding* agar ketidakstabilan tegangan dapat dicegah. Faktor semacam batas waktu beban berlebih dan hilangnya beban akibat tegangan yang terlalu rendah menjadi hal penting yang harus diperhatikan. Oleh karena itu diperlukan respons yang cukup cepat agar stabilitas tegangan dapat dijaga.

Analisis Dinamik dan *Steady State*

Analisis stabilitas tegangan meliputi aspek dinamik dan *steady state* [20]. Kedua pendekatan ini sudah umum dilakukan. *Static* atau *steady state* adalah metode utama yang diandalkan dalam analisis seperti model *Power Flow* atau model dinamik linear, yang menjelaskan operasional *steady state*. Metode ini telah dapat dipisahkan menjadi beberapa macam sebagai berikut [19,21].

1. Metode *load flow*, yakni dengan mengandalkan keberadaan profil tegangan pada jaringan. Pendekatan ini fokus pada kemampuan transfer daya maksimum oleh jaringan atau keberadaan penyelesaian masalah *load flow*. Banyak kriteria yang diusulkan di bawah pendekatan ini, antara lain:
 - Kemampuan daya reaktif (Kurva Q-V)
 - Batas maksimum transfer daya (Kurva P-V)
 - Indeks kedekatan ketidakstabilan tegangan atau indeks kelayakan *load flow* (LFF).
2. Metode stabilitas *steady state*, yakni dengan test keberadaan titik operasional keseimbangan sistem tenaga. Beberapa pendekatan kriteria yang diusulkan adalah sebagai berikut.
 - *Eigenvalue* persamaan dinamik linear (ELD)
 - *Singular value* matriks jacobian (SVJ)
 - Matriks Sensitivitas.

Stabilitas tegangan merupakan masalah fenomena dinamik. Analisis dinamik termasuk dalam penggunaan suatu model karakteristik persamaan nonlinear, sedangkan aljabar termasuk generator dinamik,

beban motor induksi, tap *changing* transformator, dll. hingga simulasi stabilitas transien. Bagaimanapun juga, simulasi seperti ini tidak siap menyediakan kepekaan informasi atau derajat stabilitas. Mereka juga menggunakan waktu kaitannya dengan kecepatan komputer dan hasil yang diperlukan *engineering* untuk analisis. Selanjutnya aplikasi simulasi dinamik terbatas untuk investigasi situasi khusus *Voltage Collapse*, termasuk cepat atau *transient Voltage Collapse* yang juga digunakan untuk koordinasi sistem proteksi dan kontrol.

Di sisi lain, analisis stabilitas tegangan regular memerlukan pemeriksaan lebar jarak kondisi sistem dan jumlah dalam keadaan kontingensi. Pendekatan yang didasarkan analisis *steady state* lebih menarik sebab mampu menyediakan analisis terbaik untuk masalah stabilitas tegangan.

Metode Analisis Stabilitas Tegangan

Banyak algoritma yang digunakan untuk analisis kestabilan tegangan di dalam bagian dari perencanaan dan operasional sistem tenaga. Implementasinya melibatkan kajian dua aspek utama. Pertama yakni mengetahui kecenderungan sistem pada ketidakstabilan tegangan. Kedua, waktu terjadi ketidakstabilan tegangan, faktor penunjang utama seumpama bus-bus yang lemah atau bus-bus kritis (*weak buses*). Banyak teknik yang telah diusulkan untuk mengevaluasi dan prediksi stabilitas tegangan menggunakan metode analisis *steady state*, seperti teknik kurva P-V, kurva Q-V dan *load flow* serta lain sebagainya [3].

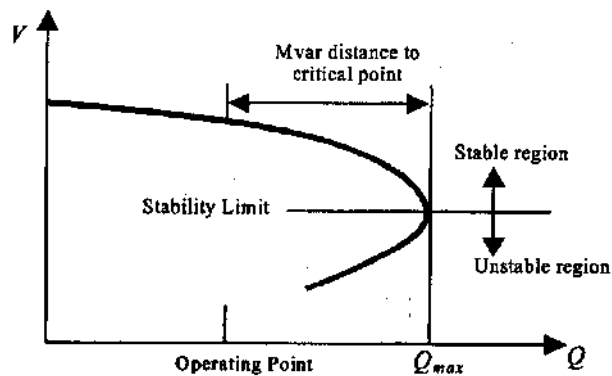
- **Kurva Q-V**

Kurva Q-V (*Voltage-reactive power*) merupakan metode yang umum digunakan untuk mengevaluasi stabilitas tegangan pada kondisi *steady state* agar diketahui bus-bus yang kritis. Kurva Q-V dibangkitkan dari simulasi *load flow*. Kurva Q-V menjelaskan sensitivitas dan variasi tegangan terhadap pengaruh injeksi daya reaktif. Kurva Q-V banyak digunakan untuk menentukan kemungkinan tegangan kolaps (*Voltage Collapse*).

Pada penyelesaian konvensional sistem tenaga listrik perencanaan dan operasionalnya, level tegangan digunakan sebagai indeks ketidakstabilan tegangan. Apabila melewati batas, dipasang pendukung daya reaktif untuk memperbaiki profil tegangan, sehingga diharapkan level tegangan dapat terpelihara dan beban daya aktif terpenuhi. Konsekuensinya ialah level tegangan tidak dapat dijadikan indikator *Voltage Collapse*.

Kurva Q-V mempunyai beberapa keuntungan [19] sebagai berikut.

1. Keamanan tegangan yang sangat terkait dengan daya reaktif, jika batas daya reaktif untuk bus yang diuji dapat ditentukan dari kurva ini.
2. Karakteristik bus yang diuji dengan dipasang paralel kompensasi daya reaktif (kapasitor, SVC dan generator sinkron) dapat diplot langsung pada kurva Q-V. Hal ini bermanfaat untuk penyelesaian stabilitas tegangan.
3. Kurva Q-V dan dihitung pada titik-titik sepanjang lengkungan kurva P-V untuk menguji ketahanan sistem.
4. Kemiringan (*slope*) kurva Q-V yang dapat mengidentifikasi kekakuan bus yang diuji.



Gambar 4.1 Kurva Q-V

Studi Aliran Daya

Studi aliran daya digunakan untuk menganalisis sistem penyaluran daya listrik dari pusat-pusat pembangkit yang disalurkan melalui saluran transmisi hingga ke pusat-pusat beban dengan memperhatikan kapasitas daya yang disalurkan dan *losses*. Studi aliran daya (*Power Flow*) dikenal dengan istilah *Load Flow* sebagai bagian penting dalam analisis sistem tenaga. Dalam penyelesaian masalah aliran daya, sistem diasumsikan dalam operasi seimbang dan menggunakan model satu fasa. Jaringan terdiri atas beberapa node/bus dan cabang dengan impedansi yang dinyatakan dalam per-unit (pu) pada base MVA. Terdapat empat parameter yang digunakan setiap bus yaitu tegangan, sudut fasa, daya aktif, dan daya reaktif. Agar bisa menganalisis aliran daya dalam suatu sistem, perlu ditentukan hal-hal berikut.

- **Matriks Admitansi Bus**

Suatu sistem dengan jumlah bus n , maka hubungan arus, tegangan dan admitansi dinyatakan dalam persamaan matriks berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

atau

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (2.11)$$

notasi:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \quad (2.12)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$$

- **Jenis Bus**

Secara umum, bus dibagi menjadi tiga kategori sebagai berikut.

1. *Slack Bus/Swing Bus/Bus Referensi*
 - Terhubung dengan generator.
 - $|V|$ dan δ beban diketahui dan nilainya tetap.
 - P dan Q dihitung.
 - Mencatu rugi-rugi daya dan beban yang tidak dapat dicatu oleh generator-generator yang lain.
2. *Load Bus/Bus Beban/P-Q Bus:*
 - Terhubung dengan beban.
 - P dan Q diketahui dan nilainya tetap.
 - $|V|$ dan δ dihitung.
3. *Regulated Bus/Generator Bus/Voltage-Controlled Bus/P-V Bus:*
 - Terhubung dengan generator.
 - P dan $|V|$ beban diketahui dan nilainya tetap.
 - $|Q|$ dan δ generator dihitung.

- **Persamaan Aliran Daya**

Persamaan aliran daya dapat ditulis dalam sistem aljabar nonlinier sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 P_i + jQ_i &= V_i I_i^* \\
 I_i &= \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Sehingga didapat:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i
 \tag{2.14}$$

Beberapa metode yang dipakai untuk menyelesaikan aliran daya adalah: Gauss-Seidel, Newton-Raphson, *Decouple*, dan *Fast-Decouple*.

- **Metode Newton-Raphson**

Metode Newton Raphson dianggap lebih efisien dan praktis, terutama untuk sistem skala besar. Hal ini karena konvergensi proses iterasi lebih cepat bila dibandingkan metode Gauss-Seidel [8]. Metode ini sedikit lebih mudah bila dibandingkan dengan metode Gauss-Seidel sebab jumlah iterasi yang dibutuhkan didasarkan pada ukuran sistem dan evaluasi fungsi pada masing-masing iterasi. Karena daya aktif dan besar tegangan pada aliran daya yang digunakan untuk *bus voltage controlled*, maka persamaan aliran daya dapat dirumuskan dalam bentuk polar.

Persamaan dapat ditulis dalam bentuk matriks admitansi sebagai berikut.

Diketahui:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2.15)$$

Bila besaran j dimasukkan ke bus i, dalam bentuk polar dapat dituliskan dengan persamaan:

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.16)$$

Daya dalam bentuk kompleks pada bus I adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2.17)$$

Substitusi persamaan (2.16) ke (2.17) diperoleh:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2.18)$$

Maka dapat ditentukan daya aktif dan daya reaktif (imajiner) diperoleh:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.19)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2.20)$$

Persamaan (2.19) dan (2.20) merupakan persamaan aljabar nonlinier, di mana setiap bus beban terdapat dua persamaan (2.19) dan (2.20) pada setiap bus generator memiliki satu persamaan (2.20). Dengan persamaan deret Taylor, maka dapat dijabarkan menjadi persamaan linear, dengan asumsi, bahwa bus 1 sebagai *slack* bus sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^k \\ \vdots \\ \Delta P_n^k \\ \Delta Q_2^k \\ \vdots \\ \Delta Q_n^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^k}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^k}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^k}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^k}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^k}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^k}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^k}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^k}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^k}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^k}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^k}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^k}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^k}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^k}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^k}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^k}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^k \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^k \\ \Delta |V_2^k| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^k| \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Dalam matriks Jacobian terjadi perbandingan linear antara perubahan terkecil sudut tegangan ($\Delta \delta_i^{(k)}$) dan besar tegangan ($\Delta |V_i^{(k)}|$) dengan perubahan daya aktif dan reaktif $\Delta Q_i^{(k)}$ dan $\Delta P_i^{(k)}$.

Persamaan (2.21) notasi koefisien matriks Jacobian adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Dari persamaan di atas, maka elemen-elemen diagonal dan *off* diagonal adalah sebagai berikut.

Untuk J_1 :

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{j \neq i}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} &= -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i\end{aligned}\tag{2.23}$$

Untuk J_2 :

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} &= 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i}^n |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} &= |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i\end{aligned}\tag{2.24}$$

Untuk J_3 :

$$\begin{aligned}\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} &= \sum_{j \neq i}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} &= -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i\end{aligned}\tag{2.25}$$

Untuk J_4 :

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} &= -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i}^n |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} &= -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i\end{aligned}\tag{2.26}$$

Bentuk ΔP_p^k dan ΔQ_p^k merupakan perbedaan antara nilai yang diketahui dengan nilai perhitungan, yang disebut dengan *power residuals* yakni sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta P_i^k &= P_i^{sch} - P_i^k \\ \Delta Q_i^k &= Q_i^{sch} - Q_i^k\end{aligned}\tag{2.27}$$

Perkiraan baru untuk bus generator adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\delta_i^{k+1} &= \delta_i^k + \Delta\delta_i^k \\ |V_i^{k+1}| &= |V_i^k| + \Delta|V_i^k|\end{aligned}\quad (2.28)$$

- **V-Q Sensitivitas**

Analisis kestabilan tegangan pada sistem tenaga listrik menggunakan pendekatan kondisi sistem tenaga listrik pada rentang waktu tertentu. Melalui analisis aliran daya menggunakan Newton-Rapshon, maka akan diperoleh informasi mengenai titik-titik beban penyebab ketidakstabilan tegangan dalam sistem tenaga listrik. Analisis ini dinamakan analisis *V-Q sensitivity*.

Batasan jaringan yang diwakili persamaan analisis dinamis dinyatakan dalam bentuk terlinearisasi berikut [9]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}\quad (2.29)$$

ΔP = Perubahan daya aktif

ΔQ = Perubahan daya reaktif yang diinjeksikan

$\Delta\theta$ = Perubahan sudut tegangan

ΔV = Perubahan besaran tegangan

Elemen-elemen matriks Jacobian memberikan sensitivitas antara perubahan-perubahan tegangan bus dan aliran daya. Matriks Jacobian pada persamaan (2.29) dimodifikasi dengan A_{11} , A_{12} , A_{21} , dan A_{22} untuk membentuk matriks Jacobian baru sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_d \\ \Delta Q_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta\theta_d \end{bmatrix}\quad (2.30)$$

ΔP_d = Perubahan *output* daya aktif peralatan

ΔQ_d = Perubahan *output* daya reaktif peralatan

ΔV_d = Perubahan besaran tegangan peralatan

$\Delta\theta_d =$ Perubahan sudut tegangan peralatan

- **Reduksi Matriks Jacobian**

Tegangan stabil pada kondisi operasi tertentu jika magnitudo tegangan pada bus tersebut meningkat saat diinjeksi daya reaktif. Sebaliknya yakni tidak akan stabil jika magnitudo tegangan berkurang ketika diinjeksi daya reaktif.

Dari persamaan (2.30), jika $\Delta P = 0$, diperoleh [2]:

$$\begin{aligned}\Delta Q &= (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \Delta V \\ &= J_R \Delta V\end{aligned}\quad (2.31)$$

dan

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (2.32)$$

notasi:

$$J_R = (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}) \quad (2.33)$$

- **Pengaruh Pembebanan Motor Induksi**

Motor induksi merupakan salah satu tipe beban linear yang bersifat induktif. Hampir 50-70% daya listrik yang dibangkitkan digunakan oleh mesin listrik, dan 90% digunakan untuk motor induksi. Hal ini menjadi pertimbangan pada sistem tenaga listrik, baik saat kondisi *steady state* maupun dinamik.

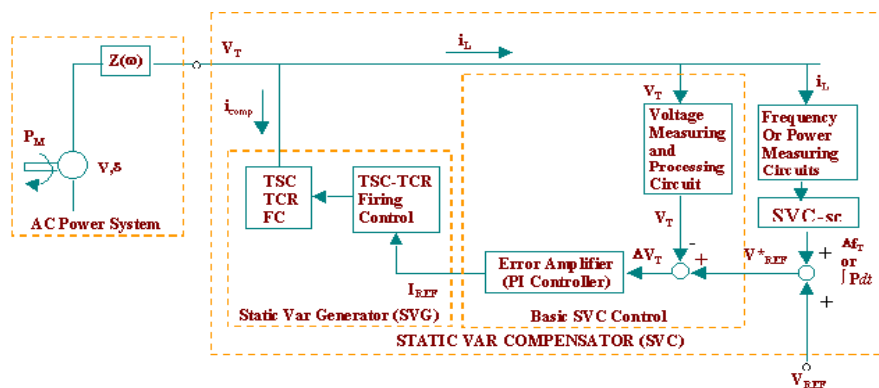
Pemilihan Lokasi SVC menggunakan Metode *Genetic Algorithms*

Static VAR Compensator (SVC)

Static VAR Compensator merupakan salah satu tipe *FACTS Device* berbasis *power electronic* yang fungsinya ialah sebagai *device switching*, reactor dan kapasitor sebagai sumber daya reaktif yang dihubungkan *shunt* dengan jaringan transmisi. Fungsi utama SVC ialah mengontrol tegangan (*stability voltage*), *stability steady state* dan dinamika tegangan

pada saluran transmisi yang panjang dan berbeban tinggi. Fungsi ini dilakukan dengan cara mengatur aliran daya reaktif yang diinjeksikan dan diserap dari jaringan (*grid*). Pada saat tegangan sistem pada *grid* rendah, (*low Voltage*), akibat peningkatan beban induktif, SVC akan menginjeksikan daya reaktif *leading* (*SVC Capacitive*) yang berasal dari kapasitor bank. Setiap kapasitor bank di *switch on-off* dengan *switch thyristor* (*Thyristor Switched Capacitor or TSC*). Begitu juga saat tegangan sistem mengalami *Over Voltage*, akibat pelepasan beban, sehingga SVC menyerap daya reaktif *lagging* (*SVC Inductive*), oleh reaktor di *switch on-off* (*Thyristor Switched Reactor or TSR*) atau *control phase* (*Thyristor Controlled Reactor or TCR*). Variasi performansi daya reaktif di *switch* oleh kapasitor bank 3 fasa, kemudian induktor bank dihubungkan pada sisi sekunder transformator [8]. Salah satu tipe rating SVC -50 MVAR (*inductive*), +100 MVAR (*capacitive*) pada tegangan 8.5 kV, 3 fasa, 50 Hz [21].

Pengaturan daya reaktif didapatkan dari pengaturan sudut penyalan *thyristor* pada rangkaian *inverter* seperti gambar berikut.

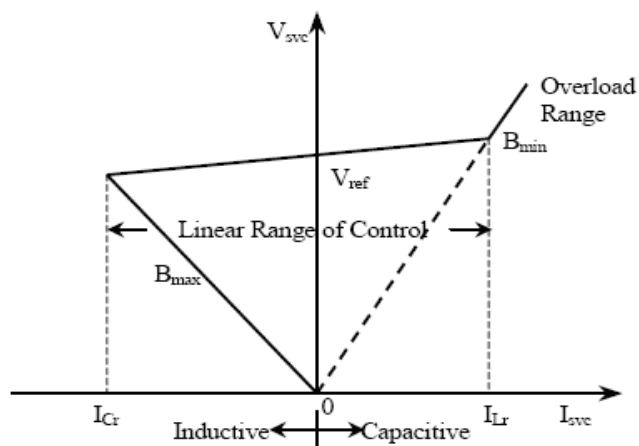


Gambar 4.2 Blok diagram Static Var Compensator

Aliran arus dalam reaktor diatur menggunakan sudut penyalan *thyristor switch*, antara 0° hingga 90° pada start gelombang tegangan. Ketika *switch* ditutup pada 0° , arus sepenuhnya mengalir melalui reaktor.

Arus reaktor ini didesain lebih tinggi dibandingkan arus kapasitor pada jaringan tegangan, arus keduanya pada fasa yang berlawanan.

SVC dioperasikan pada kondisi induktif. Pada saat sudut penyalan diperbesar, arus induktif dapat dikurangi. Setelah itu ialah mempertemukan titik, di mana penjumlahan arus keduanya adalah kapasitif. Dalam hal ini ada tiga catatan penting sebagai berikut. Pertama, saat arus akan menjadi induktif pada ujung jaringan yang mengandung harmonisa, pengaturan dilakukan di sini. Kedua, *thyristor* secara bergantian meng-*off*-kan arus induktif pada ujung jaringan demikian juga seterusnya. Ketiga, pengaturan di bawah operasi statis dalam kondisi tertentu dan dapat keluar dengan nilai kapasitif tinggi untuk *output* daya reaktif yang besar pada kecepatan waktu di beberapa *cycle* (putaran), jika dibutuhkan oleh sistem tenaga.



Gambar 4.3. Karakteristik Tegangan dan Arus SVC

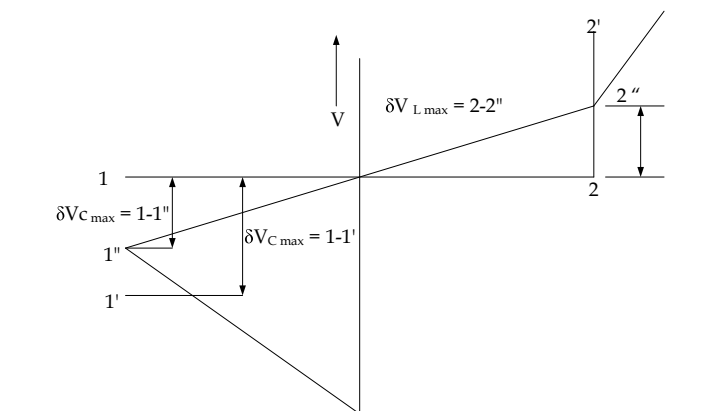
Prinsip Kerja SVC

Pada saat sistem mengalami *overload*, dan arus kapasitif disuplai oleh kapasitor, dengan cara mengurangi *output* arus reaktor, sehingga *output* injeksi SVC ke sistem adalah kapasitif. Arus maksimum kapasitif yang diberikan SVC adalah I_{Cmax} dengan cara menurunkan arus *output*

Titik referensi pada SVC sekarang akan menjadi aktif berada sepanjang kemiringan impedansi sumber yang ditunjukkan oleh garis sejajar berbeda pada gambar di atas (tanda garis ZA). Tegangan bus adalah $V_S - V_{C_{max}}$. Pada kondisi beban ringan, impedansi bus digeserkan ke atas sehingga tegangan pada bus meningkat. SVC sekarang menggeserkan induktif drop tegangan $\Delta V_{L_{max}}$ dan menetapkan tegangan bus pada titik 2'. Pengaturan menghasilkan garis 1'-2' sebagai pengganti 1-2, yang mana menjelaskan daerah pengaturan penuh kapasitas SVC.

Kompromi yang Disarankan

Jika benar untuk reduksi celah 1'-1 dan 2'-2, maka akan mempunyai peningkatan I_{lead} untuk *output* pada sisi sebelah kiri dan I_{lag} pada sisi kanan. Bahkan menentukan untuk celah 1''-1 dan 2''-2 yang diizinkan di bawah *setting* toleransi tegangan. Selanjutnya pengaturan sekarang mengikuti garis 1''-2'' sehingga mencapai pengaturan seperti pada gambar di bawah ini.



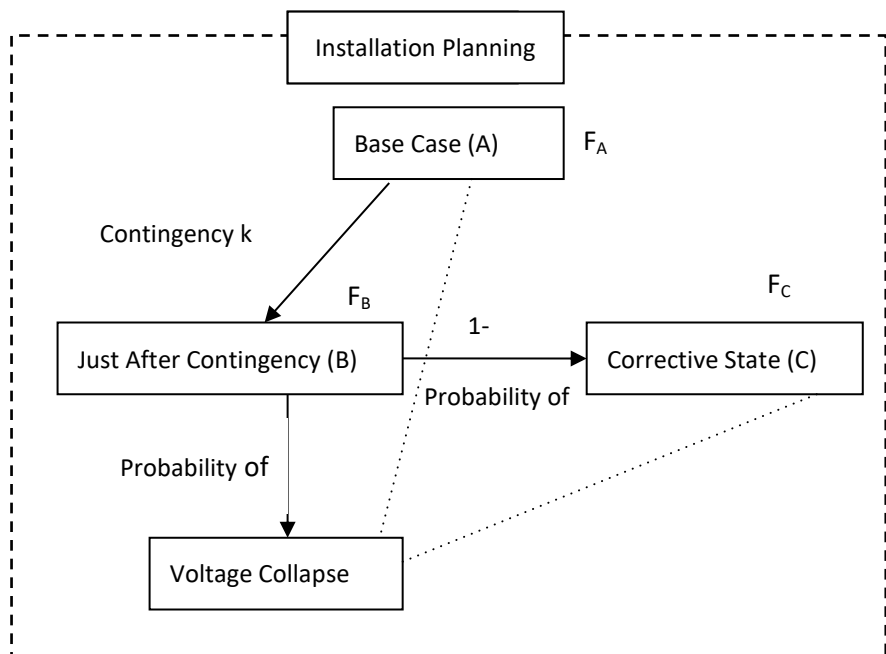
Gambar 4.5 Pengaturan Tegangan SVC

Ada dua keuntungan dari pengaturan ini. Pertama, untuk jarak pengaturan tegangan yang diizinkan, ukuran dan biaya SVC, komponen-komponen pereduksi. Kedua, alternatif dengan ukuran komponen-komponen ini dapat meliputi lebar jarak pengaturan tegangan. Dengan

demikian, dengan menggunakan FACTS tersebut kita dapat meningkatkan batas kemampuan termal jaringan transmisi. Penggunaan FACTS merupakan alternatif baru pada bidang transmisi tenaga listrik yang dapat meningkatkan kemampuan transfer daya tenaga listrik tanpa pembangunan konstruksi jaringan listrik yang baru. Keefleksibelan, keefektifan dan keandalan FACTS memberikan keuntungan dalam operasi aliran daya dan kontrol.

Fungsi Objektif

Fungsi objektif di sini ialah untuk meminimalkan jumlah biaya yang diharapkan pada beberapa periode operasional sistem tenaga, dengan termasuk biaya investasi dan biaya operasional gabungan dengan setiap bagian pada seperti gambar di bawah ini. Keseluruhan fungsi objektif dapat dijelaskan dengan persamaan (3.1) sebagai berikut.



Gambar 4.6 Sistem bagian Peralihan

$$F = F_{It} + F_A + \sum_{k=1}^m (F_B^{(k)} + F_C^{(k)}) \quad (3.1)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} F_A &= F_{EC} + \omega (\bar{\lambda}_A) F_{BD}, \\ F_B^{(k)} &= \alpha^{(k)} \beta^{(k)} (\bar{\lambda}_B^{(k)}) \\ F_{BD} \text{ \& } F_C^{(k)} &= \alpha^{(k)} \left(1 - \beta^{(k)} (\bar{\lambda}_B^{(k)}) \right) \\ &\left(F_{CL} + F_{SH} + \gamma^{(k)} (\bar{\lambda}_C^{(k)}) F_{BD} \right) \end{aligned}$$

Notasi:

A,B,C = Referensi untuk base case, setelah kontingensi dan bagian yang diperbaiki, dan keduanya.

$\alpha^{(k)}$ = kemungkinan kejadian kontingensi k ;

ω, β, γ = Kemungkinan *breakdown* melalui bagian A, B dan C

F_{It} = Biaya investasi

F_A = Biaya operasional base case

F_B = Biaya tak terduga setelah kontingensi

F_C = Perkiraan bagian biaya perbaikan.

F_{BD} = Biaya kerusakan (*breakdown*)

F_{EC} = Biaya produksi atau biaya *losses*

F_{CL} = Biaya kontrol

F_{SM} = Biaya batas pembebanan

F_{SH} = Biaya pelepasan beban

λ = Nilai parameter beban, ($\lambda = 1$ pada base case)

$\bar{\lambda}_A, \bar{\lambda}_B, \bar{\lambda}_C$ = Nilai parameter beban untuk bagian (*collapse point*) A, B dan C

Operasional base case

Target untuk meminimalkan jumlah biaya produksi atau loses daya dan batas biaya pembebanan dapat dijelaskan sebagai berikut.

$$\text{minimal } F_A = F_{SM}(\bar{\lambda}_A) + F_{EC}(x_A) \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{untuk subject } f_A(x_A, 1, p_A, 0, c_A) &= 0 \\ g_A(x_A, 1, p_A, 0, c_A) &\leq 0 \\ 0 \leq C_A &\leq \text{Cit} \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} h_A(\bar{x}_A, \bar{\lambda}_A, \bar{p}_A, 0, \bar{C}_A) &= 0 \\ r_A(\bar{x}_A, \bar{\lambda}_A, \bar{p}_A, 0, \bar{C}_A) &\leq 0 \\ 0 \leq \bar{C}_A &\leq \text{Cit} \end{aligned} \quad (3.4)$$

keterangan $(F_{SM}(\bar{\lambda}_A) = \omega(\bar{\lambda}_A) F_{BD})$ biaya batas pembebanan dari base case.

Perbaikan setelah kontingensi

Tujuan yang didefinisikan ialah meminimalkan pengeluaran biaya $F_c^{(k)}$ pada perbaikan bagian C.

$$\begin{aligned} F_c^{(k)} &= \alpha^{(k)} (1 - \beta^{(k)}(\bar{\lambda}_B^{(k)})) x \{ F_{SH}(S_C^{(k)}) + F_{SM}(\bar{\lambda}_B^{(k)}) + F_{CL}(p_A, p_C^{(k)}, C_A, C_C^{(k)}) \} \\ F_{Cl} &= \sum_i \mu p_i (p_{Ci}^{(k)} - p^2 A_i) + \sum_i \mu c_j (c_{Cj}^{(k)} - C_{Aj})^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Batasan operasional beban nominal untuk kontingensi k

$$\begin{aligned} f_c^{(k)}(x_c^{(k)}, 1, p_c^{(k)}, s_c^{(k)}, c_c^{(k)}) &= 0 \\ g_c^{(k)}(x_c^{(k)}, 1, p_c^{(k)}, s_c^{(k)}, c_c^{(k)}) &\leq 0 \\ 0 \leq c_c^{(k)} &\leq c_{It} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Batasan *Voltage Collapse* untuk kontingensi k

$$\begin{aligned} h_c^{(k)}(\bar{x}_c^{(k)}, \bar{\lambda}_c^{(k)}, \bar{p}_c^{(k)}, s_c^{(k)}, c_c^{(k)}) &= 0 \\ r_c^{(k)}(\bar{x}_c^{(k)}, \bar{\lambda}_c^{(k)}, \bar{p}_c^{(k)}, s_c^{(k)}, c_c^{(k)}) &\leq 0 \end{aligned}$$

$$0 \leq c_C^{(k)} \leq c_{It} \quad (3.7)$$

Di mana $(F_{SM}(\bar{\lambda}_c^{(k)}) = \gamma^{(k)}(\bar{\lambda}_c^{(k)})F_{BD})$ batas biaya beban kontingensi k

Persamaan untuk keseluruhan fungsi optimasi

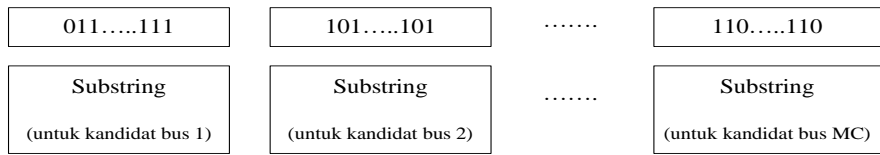
$$F = F_{It} + F_A + \sum_{k=1}^m F_C^{(k)} \quad (3.8)$$

Genetic Algorithms

Genetika algoritma menggunakan prinsip evolusi alam dan genetika populasi dalam rangka mencari solusi berkualitas tinggi dan bersifat global. Variabel desain yang diperlukan dikodekan ke dalam bilangan biner sebagai set dari gen-gen terkait kromosom dalam sistem biologi. Hal ini tidak seperti teknik optimisasi tradisional yang membutuhkan satu titik awal sebagai kondisi mula-mula. Tiap titik disebut kromosom, dan sekelompok kromosom disebut populasi. Jumlah kromosom dalam populasi biasanya dipilih antara 30-300. Tiap kromosom adalah kode bilangan biner (gen) dan bisa mengandung *substring*. Kontribusi dari *string* ditentukan oleh fungsi *fitness*, yang diperoleh dari fungsi objektif yang digunakan untuk menjalankan operasi genetika. Pada setiap prosedur iterasi (dikenal sebagai generasi), set baru dari *string* dengan hasil yang telah ditingkatkan dibuat menggunakan 3 operator GA (reproduksi, kawin silang dan mutasi).

- **Struktur Kromosom**

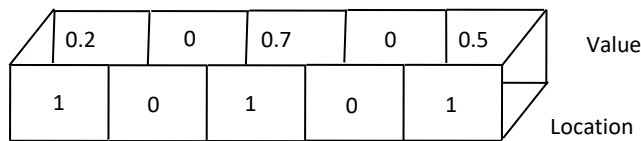
Struktur kromosom GA mengandung *Substring* MC dari angka biner seperti gambar di bawah ini. MC menandakan angka kemungkinan kompensasi pada bus-bus kandidat untuk penempatan SVC pada *feeder*, sedangkan angka biner mengindikasikan ukuran SVC yang dipasang pada bus.



Gambar 4.7 Struktur Kromosom untuk GA

- **Encoding**

Dalam rangka menemukan lokasi optimal untuk SVC pada batasan persamaan dan pertidaksamaan, konfigurasi SVC dikodekan oleh 2 parameter, yakni lokasi dan nilainya. Setiap individu dinyatakan oleh nomor n_{SVC} dari *string*, dan n_{SVC} merupakan nomor *FACTS Device* yang diperlukan untuk dianalisis dalam sistem tenaga, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.8 Pengkodean Individu dari *FACTS Device*

Nilai awal setiap *string* berkaitan dengan informasi lokasi. Ini merupakan nomor saluran transmisi lokasi *FACTS*. Setiap *string* memiliki nilai lokasi yang berbeda. Artinya, harus dipastikan bahwa pada satu bus beban hanya ada satu *FACTS Device*. Lebih jauh lagi, SVC dipasang hanya pada satu node (simpul). Nilai kedua menyatakan *value FACTS Device*.

- **Populasi Awal**

Populasi awal dibuat dari parameter berikut ini.

n_{FACTS} : jumlah *FACTS Device* yang ditempatkan.

$n_{Location}$: lokasi yang mungkin untuk *FACTS Device*.

n_{Ind} : jumlah individu pada populasi.

Pertama ialah dibuatkan sekelompok n_{FACTS} *string*. Untuk setiap *string*, nilai awal adalah nilai acak yang dipilih dari lokasi yang mungkin $n_{Location}$. Nilai kedua dari setiap *string*, mengandung nilai dari *FACTS Device*, yang dipilih secara acak antara -1 dan 1. Agar diperoleh semua populasi awal, operasi di atas diulang sebanyak n_{Ind} kali.

- **Perhitungan *Fitness***

Setelah mengkodekan, fungsi objektif (*fitness*) dievaluasi di level individu pada populasi. *Fitness* merupakan perhitungan kualitas yang digunakan untuk membandingkan solusi yang berbeda. Mengingat GA hanya dapat menemukan nilai maksimum positif dari fungsi objektif, konstanta m positif yang besar dipilih untuk mengubah fungsi objektif menjadi maksimum. Setelah itu dilakukan reproduksi, kawin silang, mutasi untuk membuat turunan.

- **Reproduksi**

Reproduksi merupakan proses di mana individu dipilih untuk pindah menuju generasi baru menurut *fitness*-nya. Dalam hal ini digunakan metode pemilihan roda *roulette* yang dibias, di mana peluang reproduksi individu proporsional dengan bagiannya dibiaskan roda *roulette*.

- **Kawin Silang**

Tujuan utama kawin silang ialah untuk mengatur ulang informasi dari dua individu berbeda, serta membuat individu yang baru. Kawin silang 2 titik diterapkan dan peluang pc dari kawin silang dipilih 0.95. Pertama, 2 titik silang dipilih secara acak di level individu. Elemen di luar 2 titik *point* dijaga menjadi bagian dari keturunan. Setelah itu, dari posisi pertama kawin silang ke titik kedua, elemen dari 3 *string* pada kedua induk ditukar.

- **Mutasi**

Mutasi digunakan untuk memperkenalkan beberapa penyebaran tiruan dalam populasi. Upaya ini dilakukan untuk menghindari

konvergensi ini mencapai optimum lokal. Mutasi tidak seragam telah membuktikan berhasil dalam beberapa studi kasus dan hal tersebutlah yang menjadi acuan di dalam bahasan kali ini.

Pada induk yang sudah diberikan $X = x_1 x_2 \dots x_k \dots x_i$, jika gen x_k dipilih untuk mutasi dan *range* x_k adalah $[U_{Min}^k, U_{Max}^k]$, maka hasil x'_k adalah:

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, U_{Max}^k - x_k) & \text{jika } random(0,1) = 0 \\ x_k - \Delta(t, x_k - U_{Min}^k) & \text{jika } random(0,1) = 1 \end{cases}$$

$$\Delta(t, y) = y \cdot \left(1 - r^{\left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot b} \right)$$

$\Delta(t,y)$ (y menyatakan $x_k - U_{Min}^k$ dan $U_{Max}^k - x_k$) mengembalikan nilai dalam *range* $[0,y]$. Peluangnya untuk mendekati 0 dan meningkat seperti t meningkat (t adalah pembuatan nomor). Kondisi ini mempermudah operator untuk mencari *space uniform* pada awalnya (ketika t kecil), dan sangat lokal pada tingkat berikutnya. Pada (), r adalah nilai acak dalam *range* $[0,1]$ dan b adalah parameter yang menentukan derajat ketidakteraturan. Dalam hal ini, simulasi menggunakan $b = 2$. Operasi seleksi, kawin silang, dan mutasi diulang dilakukan sampai ditemukan individu terbaik.

Simulasi dan Analisis

Sistem Tenaga Listrik pada Sistem 500 kV Jawa-Bali

Penulis sepenuhnya menggunakan data dari sistem tenaga listrik Jawa-Bali pada sistem tegangan transmisi 500 kV. Untuk menyelesaikan *contingency* sistem Jawa-Bali, terlebih dahulu kita menetapkan diagram segaris yang dianalisis.

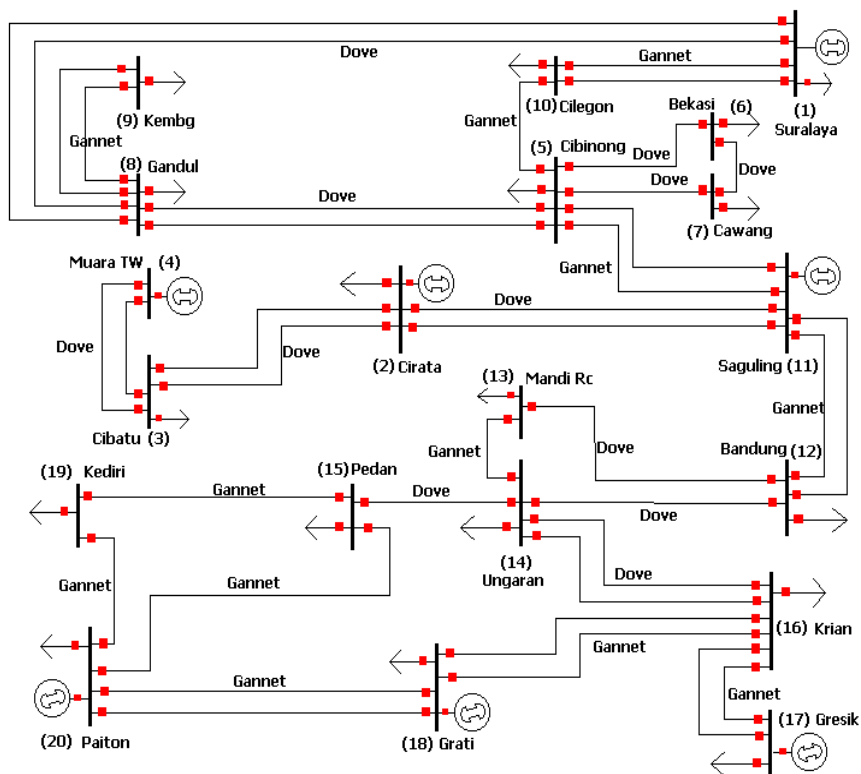
Data jaringan tenaga listrik pada sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV yang digunakan ialah data tahun 2004 yang terdiri dari 20 bus dan 37 saluran serta 7 pusat pembangkit. Base yang digunakan pada perhitungan adalah sebagai berikut.

- a. Base tegangan : 500 kV.
- b. Base daya : 50 MVA.

Sementara bus-bus yang ada diklasifikasikan sebagai berikut.

- a. *Slack bus* (swing): Bus Suralaya.
- b. Bus Generator: Bus Muaratawar, Bus Cirata, Bus Saguling, Bus Paiton, Bus Grati, dan Bus Gresik.
- c. Bus Beban: Bus Bekasi, Bus Cilegon, Bus Cawang, Bus Kembangan, Bus Gandul, Bus Bandung, Bus Cibinong, Bus Cibatun, Bus Mandi Racan, Bus Pedan, Bus Krian, Bus Ungaran dan Bus Kediri.

Single line diagram untuk sistem Jawa-Bali 500 kV dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.9 Diagram Satu Garis Sistem 500 kV Jawa-Bali

Data Pembangkitan dan Pembebanan

Tabel 4.1 Data Pembangkit dan Pembebanan Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali

No	Bus	Jenis	Pembangkit		Pembebanan		V (pu)
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)	
1	Suralaya	Slack	-	-	132	44	1.006
2	Cirata	Generator	600	-	524.6	289	1.010
3	Cibatu	Beban	0	0	447.5	227	-
4	Muara Tawar	Generator	606	-	0	0	1.021
5	Cibinong	Beban	0	0	224.9	141	-
6	Bekasi	Beban	0	0	452.2	179	-
7	Cawang	Beban	0	0	594.7	322	-
8	Gandul	Beban	0	0	599.3	314	-
9	Kembangan	Beban	0	0	717.3	411	-
10	Cilegon	Beban	0	0	475.1	241	-
11	Saguling	Generator	432	-	0	0	1.000
12	Bandung	Beban	0	0	638.8	377	-
13	Mandi Racan	Beban	0	0	428.9	283	-
14	Ungaran	Beban	0	0	384.7	227	-
15	Pedan	Beban	0	0	288.5	99.8	-
16	Krian	Beban	0	0	569.7	382	-
17	Gresik	Generator	681	-	432.7	457	1.034
18	Grati	Generator	442	-	200	120	1.023
19	Kediri	Beban	0	0	241.7	23.4	-
20	Paiton	Generator	2494	-	491.3	72.1	1.034

Sumber: PT. PLN (Persero) P3B Jawa-Bali

Data Saluran Transmisi

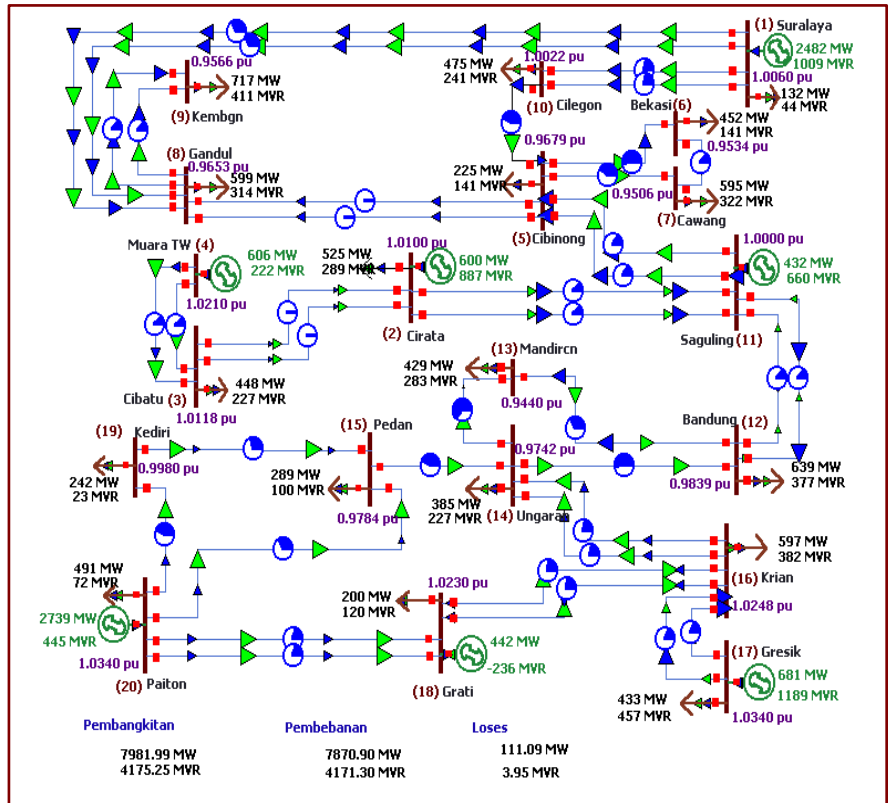
Tabel 4.2 Data Saluran Transmisi 500 kV Jawa-Bali

No	Bus ke Bus	Panjang (km)	R (pu)	X (pu)	B (pu)	S Max (MVA)
1	1-8	111	0.00065046	0.0062493	1.139	2003.76
2	1-10	12.48	6.26496E-05	7.0087E-04	0.1263	2501.66
3	2-3	44.56	0.00026112	0.00250873	0.4733	2530.00
4	2-11	25.1	0.000147088	0.00141313	0.2537	2530.00
5	3-4	55	0.0003223	0.0030668	0.4855	2541.13
6	5-6	37.92	2.222E-04	0.00213489	0.0956	1270.819
7	5-7	57	0.00033402	0.0032091	0.13735	1270.819
8	5-8	21.3	0.000124818	0.00119919	0.2147	2541.13
9	5-10	116	0.00067976	0.0065308	0.32962	1411.67
10	5-11	80.3	0.000470558	0.00452089	0.8179	2833.60
11	6-7	18	0.00010548	0.0010134	0.04233	1270.82
12	8-9	31.9	0.000160138	0.00179150	0.3051	2501.66
13	11-12	37.43	0.000187899	0.00210207	0.3797	2501.66
14	12-13	130	0.0007618	0.007319	0.30006	1012.00
15	12-14	342.8	0.002008808	0.01929964	0.86385	1012.00
16	13-14	228	0.001340065	0.01287468	0.6489	1012.00
17	14-15	75	0.0004395	0.004182	0.1890	1159.75
18	14-16	251	0.00147086	0.0141313	2.5311	2319.50
19	15-19	202.783	0.001015325	0.0119325	0.51175	1113.20
20	15-20	410	0.0024026	0.0228616	1.05123	1411.67
21	16-17	22.2	0.000130092	0.00123787	0.2409	2102.94
22	16-18	74	0.00037148	0.00415584	0.8038	2803.60
23	18-20	74	0.00037148	0.00415584	0.8992	2833.60
24	19-20	212.217	0.001065325	0.01138829	0.5395	1411.67

Simulasi dan Analisis Menggunakan PowerWorld Simulator

- Simulasi pada Kondisi Awal

Aliran daya pada kondisi awal pada sistem Jawa-Bali 500 kV dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.10 Aliran Daya pada Kondisi Awal

Tabel 4.3 Besar Nilai Aliran Daya dengan Metode Newton–Raphson
Menggunakan PowerWorld Simulator

No.	Nama	Volt (PU)	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load (MW)	Load (Mvar)	Gen (MW)	Gen (Mvar)
1	Suralaya	1.00600	503.000	0.00	132.0	44.0	2481.84	1008.93
2	Cirata	1.01000	505.000	-2.67	524.6	289.0	600.00	887.41
3	Cibatu	1.01181	505.905	-2.45	447.5	227.0	-	-
4	Muara TW	1.02100	510.500	-1.47	-	-	606.00	222.18
5	Cibinong	0.96786	483.932	-4.60	224.9	141.0	-	-
6	Bekasi	0.95342	476.710	-6.12	452.2	141.0	-	-
7	Cawang	0.95063	475.315	-6.30	594.7	322.0	-	-
8	Gandul	0.96531	482.655	-4.60	599.3	314.0	-	-
9	Kembgn	0.95660	478.298	-5.36	717.3	411.0	-	-
10	Cilegon	1.00220	501.102	-0.40	475.1	241.0	-	-
11	Saguling	1.00000	500.000	-2.79	-	-	432.00	659.88
12	Bandung	0.98393	491.967	-2.61	638.8	377.0	-	-
13	Mandircn	0.94405	472.024	-0.51	428.9	283.0	-	-
14	Ungaran	0.97415	487.076	9.72	384.7	227.0	-	-
15	Pedan	0.97837	489.185	12.26	288.5	99.8	-	-
16	Krian	1.02476	512.382	18.16	596.7	382.0	-	-
17	Gresik	1.03400	517.000	18.27	432.7	457.0	681.00	1188.50
18	Grati	1.02300	511.500	21.43	200.0	120.0	442.00	-236.27
19	Kediri	0.99802	499.010	16.75	241.7	23.4	-	-
20	Paiton	1.03400	517.000	24.08	491.3	72.1	2739.16	444.62
Jumlah					7870.9	4171.3	7982.00	4175.25

Jumlah Bus = 20

Pembangkitan = 7982,00 + 4175,25i

Pembebanan = 7870,90 + 4171,30i

Loses = 111,09 + 3,95i

Tabel 4.4 Power Flow List pada Kondisi Sebelum Contingency

BUS 1 Suralaya 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0060	0.00
GENERATOR 1	2481.84	1008.93R	2679.1			
LOAD 1	132.00	44.00	139.1			
TO 8 Gandul 1	653.21	255.79	701.5	35		
TO 8 Gandul 2	653.21	255.79	701.5	35		
TO 10 Cilegon 1	521.71	226.67	568.8	23		
TO 10 Cilegon 2	521.71	226.67	568.8	23		
BUS 2 Cirata 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0100	-2.67
GENERATOR 1	6000.00	887.41R	1071.2			
LOAD 1	524.60	289.00	598.90			
TO 3 Cibatu 1	-78.56	-40.20	88.20	3		
TO 3 Cibatu 2	-78.56	-40.20	88.20	3		
TO 11 Saguling 1	116.25	339.41	358.80	14		
TO 11 Saguling 2	116.25	339.41	358.80	14		
BUS 3 Cibatu 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0118	-2.45
LOAD 1	447.50	227.00	501.80			
TO 2 Cirata 1	78.59	16.36	803.30	3		
TO 2 Cirata 2	78.59	16.36	803.30	3		
TO 4 Muara TW 1	-320.24	-129.86	329.00	13		
TO 4 Muara TW 2	-320.24	-129.86	329.00	13		
BUS 4 Muara TW 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0210	-1.47
GENERATOR 1	606.00	222.18R	645.4			
TO 3 Cibatu 1	303.00	111.09	322.70	13		
TO 3 Cibatu 2	303.00	111.09	322.70	13		
BUS 5 Cibinong 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9679	-4.60
LOAD 1	224.90	141.00	265.40			
TO 6 Bekasi 1	603.72	271.22	661.52	52		
TO 7 Cawang 1	447.07	216.93	496.90	39		
TO 8 Gandul 1	12.22	96.79	97.60	4		
TO 8 Gandul 2	12.22	96.79	97.60	4		
TO 10 Cilegon 1	-562.50	-183.66	591.70	42		
TO 11 Saguling 1	-368.82	-319.53	488.00	17		
TO 11 Saguling 2	-368.82	-319.53	488.00	17		
BUS 6 Bekasi 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9534	-6.12
LOAD 1	452.20	141.00	473.7			
TO 5 Cibinong 1	-601.66	-255.65	653.70	51		
TO 7 Cawang 1	149.46	114.65	188.40	15		

BUS 7 Cawang 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9506	-6.30
LOAD 1	594.70	322.00	676.30			
TO 5 Cibinong 1 39	-445.33	-206.22	490.80	39		
TO 6 Bekasi 1	149.37	115.78	189.00	15		

BUS 8 Gandul 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9653	-4.60
LOAD 1	599.30	314.00	676.60			
TO 1 Suralaya 1	-646.69	-248.44	692.80	35		
TO 1 Suralaya 2	-646.69	-248.44	692.80	35		
TO 5 Cibinong 1	-12.20	-106.55	107.20	4		
TO 5 Cibinong 2	-12.20	-106.55	107.20	4		
TO 9 Kembang 1	359.25	197.99	410.20	16		
TO 9 Kembang 2	359.25	197.99	410.20	16		
BUS 9 Kembang 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9566	-5.36
LOAD 1	717.30	411.00	826.7			
TO 8 Gandul 1	-358.65	-205.50	413.40	17		
TO 8 Gandul 2	-358.65	-205.50	413.40	17		

BUS 10 Cilegon 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0022	-0.40
LOAD 1	475.10	241.00	532.70			
TO 1 Suralaya 1	-521.32	-228.54	569.20	23		
TO 1 Suralaya 2	-521.32	-228.54	569.20	23		
TO 5 Cibinong 1	567.55	216.09	607.30	43		

BUS 11 Saguling 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0000	-2.79
GENERATOR 1	432.00	659.88R	788.70			
TO 2 Cirata 1	-115.86	-348.54	367.30	15		
TO 2 Cirata 2	-115.86	-348.54	367.30	15		
TO 5 Cibinong 1	371.09	301.77	478.30	15		
TO 5 Cibinong 2	371.09	301.77	478.30	15		
TO 12 Bandung 1	-39.23	376.71	378.70	15		
TO 12 Bandung 2	-39.23	376.71	378.70	15		

BUS 12 Bandung 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9839	-2.61
LOAD 1	638.80	377.00	741.8			
TO 11 Saguling 1	39.80	-398.06	391.10	16		
TO 11 Saguling 2	39.80	-398.06	391.10	16		
TO 13 Mandirca 1	-202.28	286.07	350.40	35		
TO 14 Ungaran 1	-516.13	115.06	528.80	52.00		

BUS 13 Mandirca 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9440	-0.51
LOAD 1	428.90	283.00	513.90			

TO 12 Bandung 1	204.27	-280.84	347.30	34
TO 14 Ungaran 1	-633.17	-2.16	633.20	63

BUS 14 Ungaran 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9742	9.72
LOAD 1	384.70	227.00	446.70			
TO 12 Bandung 1	527.96	-42.88	529.70	52		
TO 13 Mandirca 1	645.23	88.14	651.20	64		
TO 15 Pedan 1	-504.16	10.65	504.30	43		
TO 16 Krian 1	-526.86	-141.46	504.30	43		
TO 16 Krian 2	-526.86	-141.46	504.30	43		

BUS 15 Pedan 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9784	12.26
LOAD 1	288.50	99.80	305.3			
TO 14 Ungaran 1	506.52	2.76	506.50	44		
TO 19 Kediri 1	-339.40	-53.07	345	31		
TO 20 Paiton 1	-445.60	-49.48	458.30	32		

BUS 16 Krian 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0248	18.16
LOAD 1	596.70	382.00	708.50			
TO 14 Ungaran 1	535.67	99.59	544.80	23		
TO 14 Ungaran 2	535.67	99.59	544.80	23		
TO 17 Gresik 1	-123.77	-374.94	394.80	19		
TO 17 Gresik 2	-123.77	-374.94	394.80	19		
TO 18 Grati 1	-710.25	84.35	715.20	26		
TO 18 Grati 2	-710.25	84.35	715.20	26		

BUS 17 Gresik 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0340	18.27
GENERATOR 1	681.00	118.50R	1369.80			
LOAD 1	432.70	457.00	629.30			
TO 16 Krian 1	124.15	365.75	386.20	18		
TO 16 Krian 2	124.15	365.75	386.20	18		

BUS 18 Grati 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0230	21.43
GENERATOR 1	442.00	-236.27R	501.2			
LOAD 1	200.00	120.00	233.20			
TO 16 Krian 1	713.88	-85.64	719	26.00		
TO 16 Krian 2	713.88	-85.64	719	26.00		
TO 20 Paiton 1	-592.88	-93.50	600.10	21.00		

BUS 19 Kediri 500.0	MW	Mvar	MVA	%	0.9980	16.75
LOAD 1	241.70	23.40	242.80			
TO 15 Pedan 1	341.89	55.90	346.40	31		

TO 20 Paiton 1	-583.59	-79.30	589.00	42
----------------	---------	--------	--------	----

BUS 20 Paiton 500.0	MW	Mvar	MVA	%	1.0340	24.08
GENERATOR 1	2739.16	44.62R	2775			
LOAD 1	491.30	72.10	496.60			
TO 15 Pedan 1	466.06	95.67	496.60	34		
TO 18 Grati 1	595.40	73.26	599.90	21		
TO 18 Grati 2	595.40	73.26	599.90	21		
TO 19 Kediri 1	591.00	130.33	605.20	43		

- **Simulasi pada Saat Contingency**

Dengan menjalankan simulasi sistem tenaga listrik menggunakan PowerWorld Simulator, kita akan memperoleh pelanggaran-pelanggaran yang terjadi secara lebih cepat. Hasil-hasil yang diperoleh adalah sebagai berikut.

Contingency dengan memutus satu saluran, sehingga diperoleh 37 *contingency* dan 68 pelanggaran (2 *max line* + 66 *bus low Volt*).

Tabel 4.5 Contingency Analysis Single Line Records

No.	Label	Skip	Processed	Solved	Violations	Max Line %	Min Volt	Max Volt
1	LUngaran-PedanC1	NO	YES	YES	1		0.938	
2	LSaguling-BandungC1	NO	YES	YES	1		0.932	
3	LPedan-KediriC1	NO	YES	YES	1		0.939	
4	LCibinong-GandulC1	NO	YES	YES	1		0.944	
5	LCirata-CibatuC2	NO	YES	YES	1		0.944	
6	LSaguling-BandungC2	NO	YES	YES	1		0.932	
7	LGrati-PaitonC1	NO	YES	YES	1		0.944	
8	LPedan-PaitonC1	NO	YES	YES	1		0.938	
9	LKrian-GratiC1	NO	YES	YES	1		0.944	
10	LCibinong-GandulC2	NO	YES	YES	1		0.944	
11	LKrian-GresikC1	NO	YES	YES	1		0.943	
12	LKrian-GratiC2	NO	YES	YES	1		0.944	
13	LCirata-CibatuC1	NO	YES	YES	1		0.944	
14	LCirata-SagulingC1	NO	YES	YES	1		0.944	
15	LCirata-SagulingC2	NO	YES	YES	1		0.944	
16	LCibatu-MuaraTWC1	NO	YES	YES	1		0.944	

No.	Label	Skip	Processed	Solved	Violations	Max Line %	Min Volt	Max Volt
17	LGrati-PaitonC2	NO	YES	YES	1		0.944	
18	LKrian-GresikC2	NO	YES	YES	1		0.943	
19	LCibatu-MuaraTWC2	NO	YES	YES	1		0.944	
20	LUngaran-KrianC2	NO	YES	YES	2		0.93	
21	LSuralaya-CilegonC1	NO	YES	YES	2		0.944	
22	LUngaran-KrianC1	NO	YES	YES	2		0.93	
23	LUngaran-MandircnC1	NO	YES	YES	2	117.3	0.924	
24	LBandung-UngaranC1	NO	YES	YES	2	117.6	0.915	
25	LBandung-MandircnC1	NO	YES	YES	2		0.843	
26	LGandul-KembgnC2	NO	YES	YES	2		0.944	
27	LGandul-KembgnC1	NO	YES	YES	2		0.944	
28	LBekasi-CawangC1	NO	YES	YES	2		0.941	
29	LSuralaya-CilegonC2	NO	YES	YES	2		0.944	
30	LCibinong-CawangC1	NO	YES	YES	3		0.931	
31	LCibinong-BekasiC1	NO	YES	YES	3		0.92	
32	LKediri-PaitonC1	NO	YES	YES	3		0.936	
33	LCibinong-CilegonC1	NO	YES	YES	4		0.941	
34	LCibinong-SagulingC2	NO	YES	YES	4		0.937	
35	LCibinong-SagulingC1	NO	YES	YES	4		0.937	
36	LSuralaya-GandulC2	NO	YES	YES	4		0.94	
37	LSuralaya-GandulC1	NO	YES	YES	4		0.94	

Tabel 4.6 Line Records dari Contingency Analysis Single Line

No.	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Xfrmr	Violations	Max % Loading Cont.
1	14	Ungaran	13	Mandircn	1	No	1	117.55
2	12	Bandung	14	Ungaran	1	No	1	117.3
3	1	Suralaya	10	Cilegon	1	No	0	
4	2	Cirata	3	Cibatu	1	No	0	
5	2	Cirata	3	Cibatu	2	No	0	
6	2	Cirata	11	Saguling	1	No	0	
7	3	Cibatu	4	Muara	1	No	0	

No.	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Xfrmr	Violations	Max % Loading Cont.
				TW				
8	5	Cibinong	11	Saguling	2	No	0	
9	3	Cibatu	4	Muara TW	2	No	0	
10	5	Cibinong	6	Bekasi	1	No	0	
11	5	Cibinong	7	Cawang	1	No	0	
12	5	Cibinong	8	Gandul	1	No	0	
13	5	Cibinong	8	Gandul	2	No	0	
14	5	Cibinong	10	Cilegon	1	No	0	
15	5	Cibinong	11	Saguling	1	No	0	
16	2	Cirata	11	Saguling	2	No	0	
17	6	Bekasi	7	Cawang	1	No	0	
18	8	Gandul	9	Kembgn	1	No	0	
19	8	Gandul	9	Kembgn	2	No	0	
20	11	Saguling	12	Bandung	1	No	0	
21	11	Saguling	12	Bandung	2	No	0	
22	12	Bandung	13	Mandircn	1	No	0	
23	1	Suralaya	10	Cilegon	2	No	0	
24	1	Suralaya	8	Gandul	2	No	0	
25	14	Ungaran	15	Pedan	1	No	0	
26	14	Ungaran	16	Krian	1	No	0	
27	14	Ungaran	16	Krian	2	No	0	
28	15	Pedan	19	Kediri	1	No	0	
29	15	Pedan	20	Paiton	1	No	0	
30	16	Krian	17	Gresik	1	No	0	
31	16	Krian	17	Gresik	2	No	0	
32	16	Krian	18	Grati	1	No	0	
33	16	Krian	18	Grati	2	No	0	
34	18	Grati	20	Paiton	1	No	0	
35	18	Grati	20	Paiton	2	No	0	
36	19	Kediri	20	Paiton	1	No	0	
37	1	Suralaya	8	Gandul	1	No	0	

Keterangan:

- a. Pelanggaran *point* 1 terjadi pada *line* Ungaran ke Mandiracan, karena pemutusan saluran dari bus #12 (Bandung) ke bus #14 (Ungaran).

Label	Category	Value	Limit	Percent
LBandung-UngaranC1	Branch MVA	1189.63	1012	117.55

- b. Pelanggaran *point* 2 terjadi pada *Line* Bandung ke Ungaran, karena pemutusan saluran dari bus #13 (mandircn) ke bus #14 (Ungaran).

Label	Category	Value	Limit	Percent
Lungaran-MandircnC1	Branch MVA	1187.03	1012	117.3

Tabel 4.7 Bus Records dari Contingency Analysis Single Line

No.	Number	Name	Nom kV	Violations	Max Voltage Cont.	Min Voltage Cont.
1	13	Mandircn	500	37		0.84
2	7	Cawang	500	10		0.92
3	6	Bekasi	500	7		0.92
4	9	Kembgn	500	7		0.94
5	14	Ungaran	500	3		0.94
6	15	Pedan	500	1		0.95
7	19	Kediri	500	1		0.94
8	12	Bandung	500	0		
9	3	Cibatu	500	0		
10	11	Saguling	500	0		
11	10	Cilegon	500	0		
12	5	Cibinong	500	0		
13	18	Grati	500	0		
14	17	Gresik	500	0		
15	16	Krian	500	0		
16	8	Gandul	500	0		
17	4	Muara TW	500	0		
18	2	Cirata	500	0		
19	20	Paiton	500	0		
20	1	Suralaya	500	0		

Keterangan:

- a. Pelanggaran *point* 1 yang terjadi di bus #13 (Mandiracan) sebanyak 37 karena pemutusan tiap saluran sebagai berikut.

Label	Category	Value	Limit
LSuralaya-GandulC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LSuralaya-GandulC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LSuralaya-CilegonC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LSuralaya-CilegonC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCirata-CibatuC1	Bus Low Volts	0.94	0.95

Label	Category	Value	Limit
LCirata-CibatuC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCirata-SagulingC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCirata-SagulingC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibatu-MuaraTWC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibatu-MuaraTWC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-BekasiC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-CawangC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-GandulC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-GandulC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-CilegonC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-SagulingC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-SagulingC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LBekasi-CawangC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LGandul-KembgnC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LGandul-KembgnC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LSaguling-BandungC1	Bus Low Volts	0.93	0.95
LSaguling-BandungC2	Bus Low Volts	0.93	0.95
LBandung-MandircnC1	Bus Low Volts	0.84	0.95
LBandung-UngaranC1	Bus Low Volts	0.91	0.95
LUngaran-MandircnC1	Bus Low Volts	0.92	0.95
LUngaran-PedanC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LUngaran-KrianC1	Bus Low Volts	0.93	0.95
LUngaran-KrianC2	Bus Low Volts	0.93	0.95
LPedan-KediriC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LPedan-PaitonC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LKrian-GresikC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LKrian-GresikC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LKrian-GratiC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LKrian-GratiC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LGrati-PaitonC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LGrati-PaitonC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LKediri-PaitonC1	Bus Low Volts	0.94	0.95

- b. Pelanggaran *point* 2 yang terjadi di bus #7 (Cawang) sebanyak 10 pelanggaran karena pemutusan tiap saluran sebagai berikut.

Label	Category	Value	Limit
LSuralaya-GandulC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LSuralaya-GandulC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LSuralaya-CilegonC1	Bus Low Volts	0.95	0.95
LSuralaya-CilegonC2	Bus Low Volts	0.95	0.95

LCibinong-BekasiC1	Bus Low Volts	0.92	0.95
LCibinong-CawangC1	Bus Low Volts	0.93	0.95
LCibinong-CilegonC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-SagulingC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-SagulingC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LBekasi-CawangC1	Bus Low Volts	0.94	0.95

- c. Pelanggaran *point* 3 yang terjadi di bus #6 (Bekasi) sebanyak 7 pelanggaran karena pemutusan tiap saluran sebagai berikut.

Label	Category	Value	Limit
LSuralaya-GandulC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LSuralaya-GandulC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-BekasiC1	Bus Low Volts	0.92	0.95
LCibinong-CawangC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-CilegonC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-SagulingC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-SagulingC2	Bus Low Volts	0.94	0.95

- d. Pelanggaran *point* 4 yang terjadi di bus #9 (Kembangan) sebanyak 7 pelanggaran karena pemutusan tiap saluran sebagai berikut.

Label	Category	Value	Limit
LSuralaya-GandulC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LSuralaya-GandulC2	Bus Low Volts	0.94	0.95
LCibinong-CilegonC1	Bus Low Volts	0.95	0.95
LCibinong-SagulingC1	Bus Low Volts	0.95	0.95
LCibinong-SagulingC2	Bus Low Volts	0.95	0.95
LGandul-KembgnC1	Bus Low Volts	0.95	0.95
LGandul-KembgnC2	Bus Low Volts	0.95	0.95

- e. Pelanggaran *point* 5 yang terjadi di bus #14 (Ungaran) sebanyak 3 pelanggaran karena pemutusan tiap saluran sebagai berikut.

Label	Category	Value	Limit
LBandung-MandircnC1	Bus Low Volts	0.95	0.95
LUngaran-KrianC1	Bus Low Volts	0.94	0.95
LUngaran-KrianC2	Bus Low Volts	0.94	0.95

- f. Pelanggaran *point* 6 yang terjadi di bus #15 (Pedan) sebanyak 1 pelanggaran karena pemutusan saluran pada:

Label	Category	Value	Limit
LKediri-PaitonC1	Bus Low Volts	0.95	0.95

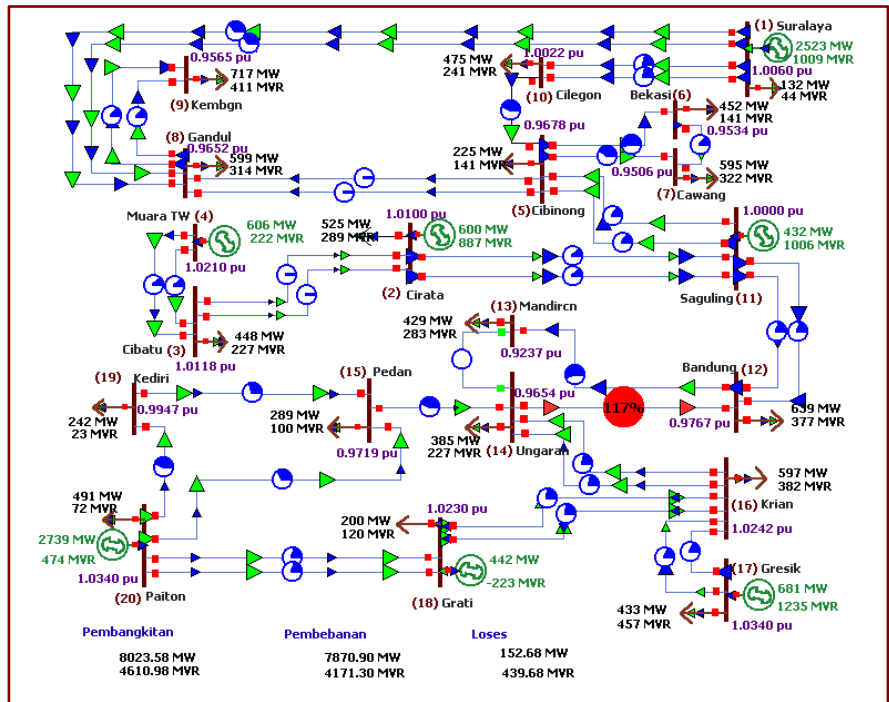
- g. Pelanggaran *point* 7 yang terjadi di bus #19 (Kediri) sebanyak 1 pelanggaran karena pemutusan saluran pada:

Label	Category	Value	Limit
LKediri-PaitonC1	Bus Low Volts	0.94	0.95

- **Arah Aliran Daya pada Kondisi *Contingency Single Line***

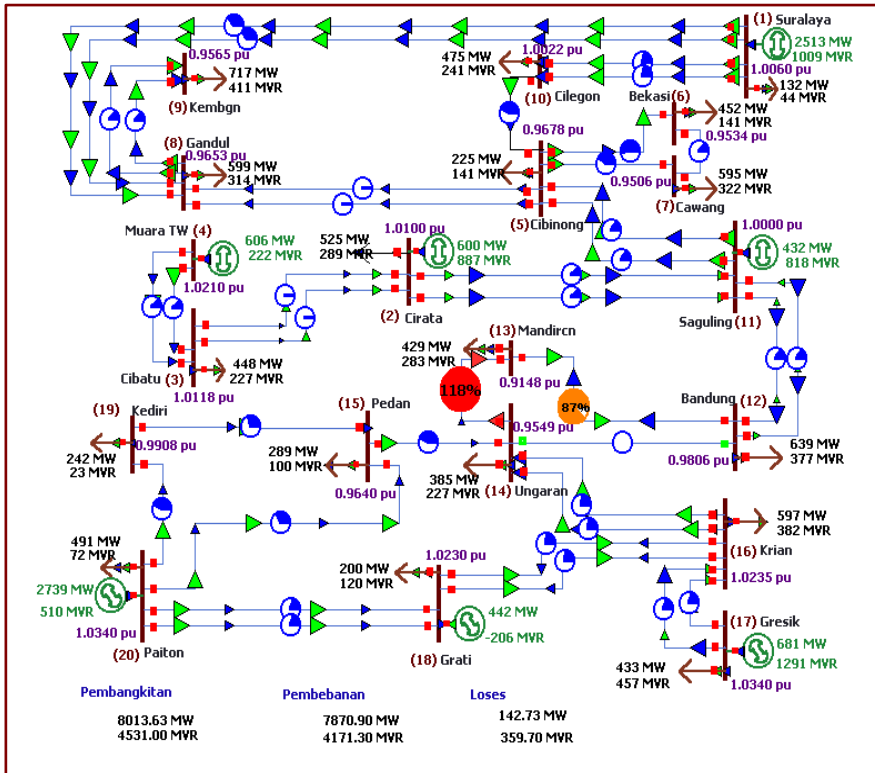
Berdasarkan hasil simulasi, aliran daya pada kondisi *contingency* melalui pemutusan salah satu saluran di dalam sistem Jawa-Bali 500 kV menunjukkan *violations* (pelanggaran-pelanggaran).

1. Pelanggaran pada suatu *line* adalah sebagai berikut.
 - a. Dengan saluran yang diputus dari bus #13 ke bus #14, maka pelanggaran terjadi pada *line* dari bus #12 ke #14 adalah seperti gambar berikut.



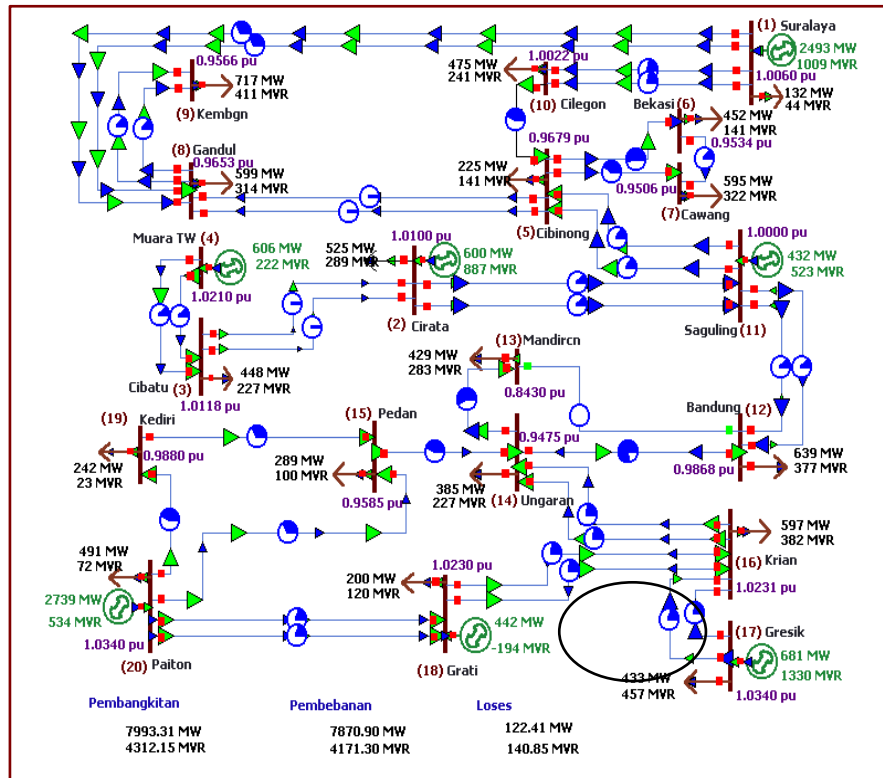
Gambar 4.11 Contingency pada Line #13 ke Line #14

- b. Saluran yang diputus dari bus #12 ke Bus #14, sehingga terjadi pelanggaran pada line dari bus #13 ke #14 seperti gambar berikut.



Gambar 4.12 Contingency pada Line #12 ke Line #14

2. Pelanggaran pada suatu bus (berdasarkan salah satu contoh pelanggaran terbesar) yakni pada bus #13 (Bus Mandirancan) akibat pemutusan *line* dari bus #12 ke #13 seperti gambar berikut.



Gambar 4.13 Contingency yang Menyebabkan Violation pada Bus #13

- Nilai *Line Outage Distribution Factors*

Tabel 4.8 Nilai Line Outage Distribution Factors dengan Contingency
Single Transmission Line untuk Daya Aktif

	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6
$\lambda=1$	0.5520123	0.032546817	0.000127243	-0.0009462	0.001155	0.00392566
$\lambda=2$	0.2325592	0.936497288	0.000127243	-0.00051613	0.000627	0.00210362
$\lambda=3$	0	0	1.000254485	0	-0.00178	0
$\lambda=4$	0	0	-0.00025449	1.000258065	-0.00178	0
$\lambda=5$	0	0	0	0	1	0
$\lambda=6$	9.185E-05	1.91677E-05	0	0	0	-
$\lambda=7$	6.1236E-05	1.91677E-05	0	0	0	1.01129663
$\lambda=8$	0.2259304	-0.01489333	-0.00012724	0.00094624	-0.00112	-0.003859
$\lambda=9$	0.4643988	-0.06480612	0.000127243	-0.0010323	0.001254	0.00419068
$\lambda=10$	0	0	-0.00025449	0.00146237	-0.00178	1.6564E-05
$\lambda=11$	1.5309E-05	0	0	0	0	0.50240178
$\lambda=12$	1.5309E-05	0	0	0	0	0
$\lambda=13$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=14$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=15$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=16$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=17$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=18$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=19$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=20$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=21$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=22$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=23$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=24$	0	0	0	0	0	0

Lanjutan

	k=7	k=8	k=9	k=10	k=11	k=12
$\lambda=1$	0.003109	0.031097	-0.02003348	0.005173947	0.001405	0.001336154
$\lambda=2$	0.001588	-0.02537	-0.5005374	0.001428225	0.000736	0.00072375
$\lambda=3$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=4$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=5$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=6$	1.008589	0	8.8098E-05	0.000188633	-1.00662	2.78365E-05
$\lambda=7$	-	0	5.28588E-05	0.000134738	1.010438	2.78365E-05
$\lambda=8$	-0.00293	0.958265	0.454162629	-0.00309898	-0.00127	0.000584567
$\lambda=9$	0.003176	-0.05074	-	0.002694764	0.001405	0.0014475
$\lambda=10$	0	0	0	1	0	0

$\lambda=11$	0.998501	0	1.76196E-05	2.69476E-05	-	0
$\lambda=12$	0	0	1.76196E-05	2.69476E-05	0	1.003451731
$\lambda=13$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=14$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=15$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=16$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=17$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=18$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=19$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=20$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=21$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=22$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=23$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=24$	0	0	0	0	0	0

Lanjutan

	k=13	k=14	k=15	k=16	k=17	k=18
$\lambda=1$	0.015829	0.017966	0.019395	0.020860778	0.009378	0.011313
$\lambda=2$	0.008543	0.009791	0.010569	0.01136029	0.005113	0.006161
$\lambda=3$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=4$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=5$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=6$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=7$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=8$	-0.01533	-0.01762	-0.01905	-0.01734265	-0.00922	-0.01111
$\lambda=9$	0.017085	0.019533	0.0211	0.022705082	0.010207	0.012302
$\lambda=10$	-0.02387	-0.07147	-0.02964	-0.03188011	-0.01433	-0.01725
$\lambda=11$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=12$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=13$	0.977387	-0.0283	-0.02917	-0.03093471	-0.01414	-0.01682
$\lambda=14$	-0.00754	-	0.938935	0.355330657	-0.01481	-0.01856
$\lambda=15$	-0.01658	0.993489	-	0.998388172	-0.01262	-0.01221
$\lambda=16$	0.000251	-1.01146	0.995246	-	-0.01495	-0.01822
$\lambda=17$	-0.02111	-0.02012	-0.00557	-0.0020303	-	0.39375
$\lambda=18$	0.007538	0.006952	0.001951	0.000728422	0.504205	0.590905
$\lambda=19$	-0.00804	-0.00749	-0.00208	-0.00075942	-0.50742	0.20255
$\lambda=20$	-0.01005	-0.00925	-0.00259	-0.0009609	-0.51382	0.206881
$\lambda=21$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=22$	0.008291	0.007637	0.00214	0.000790416	0.510582	-0.20647
$\lambda=23$	0.008291	0.007686	0.002159	0.000805914	0.515755	-0.208
$\lambda=24$	-0.00678	-0.00617	-0.00172	-0.00063543	-0.51767	0.209121

Lanjutan

	k=19	k=20	k=21	k=22	k=23	k=24
$\lambda=1$	0.009272	0.009548	0.001449859	0.00302572	0.002402	0.013942
$\lambda=2$	0.005031	0.005214	0.000805477	0.00163893	0.00131	0.007597
$\lambda=3$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=4$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=5$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=6$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=7$	0.001901	0	0	0	0	0
$\lambda=8$	-0.0091	-0.00938	-0.0013693	-0.0029557	-0.00235	-0.01369
$\lambda=9$	0.010062	0.010385	0.001610954	0.00327786	0.00262	0.015161
$\lambda=10$	-0.01416	-0.01459	-0.00225534	-0.0046086	-0.00368	-0.0213
$\lambda=11$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=12$	0	0	0	0	0	0
$\lambda=13$	-0.01392	-0.0144	-0.00201369	-0.0046086	-0.00368	-0.02108
$\lambda=14$	-0.01474	-0.01504	-0.00298027	-0.0045106	-0.00359	-0.02162
$\lambda=15$	-0.01208	-0.013	8.05477E-05	-0.0049308	-0.00395	-0.01993
$\lambda=16$	-0.01486	-0.01521	-0.0027386	-0.0046647	-0.00373	-0.02198
$\lambda=17$	-0.61929	0.360898	0.013773661	0.13024598	0.129039	-0.62032
$\lambda=18$	0.305391	0.298352	-0.00829642	-0.0712865	-0.0697	0.29934
$\lambda=19$	-	0.378621	0.007490938	0.06645375	0.065821	-0.16724
$\lambda=20$	0.394659	-	0.007329843	0.06793859	0.067585	0.388173
$\lambda=21$	0	0	1	1.4008E-05	0	0
$\lambda=22$	0.308988	0.301914	-0.00757149	0.86487925	-0.07041	0.303029
$\lambda=23$	0.311767	0.304703	-0.00765203	-0.0680927	0.865133	0.305905
$\lambda=24$	-1.01819	0.390572	0.007974225	0.06824676	0.067568	-

Keterangan: k: merupakan nomor urut line yang terputus.

λ : merupakan nomor urut line yang diamati.

Nomor urut berdasarkan tabel yang menyajikan Data Saluran Transmisi 500 kV Jawa-Bali.

Bagian 5

Alokasi Rugi Transmisi dan Biaya Daya Reaktif dengan Metode Z-Bus & Modifikasi Matriks Y-Bus

Dr. Firdaus, S.Pd., M.T
dauselektro@unm.ac.id

Seiring dengan perkembangan zaman, pertumbuhan dan perkembangan taraf hidup masyarakat yang semakin maju membuat energi listrik menjadi kebutuhan utama. Tenaga listrik dibangkitkan di pusat-pusat listrik tenaga (PLT), seperti tenaga air (PLTA), tenaga uap (PLTU), tenaga panas bumi (PLTP), tenaga gas (PLTG), tenaga disel (PLTD), tenaga nuklir (PLTN) dan lain sebagainya. Pusat-pusat listrik yang menggunakan tenaga air (PLTA) sebagian besar terletak jauh dari pusat beban (*load centres*). Karena itu tenaga listrik yang dibangkitkan harus disalurkan melalui kawat-kawat atau saluran transmisi.

Pengiriman tenaga listrik dari pusat pembangkit ke beban melalui saluran transmisi mengalami rugi-rugi transmisi yang mana hal ini juga mempengaruhi kualitas sistem tenaga listrik. Agar sistem berjalan normal, beberapa layanan tambahan diperlukan, misalnya peralatan untuk injeksi daya reaktif. Pastinya, biaya tambahan akan dibagi oleh pemakai dan penentuan biaya secara wajar menjadi isu penting.

Metode yang wajar untuk menentukan biaya membantu partisipan pasar dengan investasi yang efisien untuk sumber daya reaktif antara lain statik kapasitor, peralatan *Flexible AC Transmission System* (FATCS), dan *synchronous condenser*. Semua itu dapat digunakan oleh operator peralatan sistem dan dapat memperkuat keamanan sistem.

Terkait dengan daya reaktif yang dikonsumsi oleh beban, di sini penulis berusaha memaparkan rencana pengembangan metode alokasi biaya daya reaktif yang disuplai oleh pembangkit, *synchronous condenser*

atau kapasitor. Maka dari itu, alokasi biaya daya aktif dan daya reaktif dapat dilihat melalui tiga kategori sebagai berikut.

- 1) Mengikuti aliran listrik, yakni dengan menghitung *upstream* matriks distribusi. Pendekatan ini dapat menarik daya aktif dan reaktif dari masing-masing pembangkit yang diterima oleh setiap beban[1].
- 2) Memastikan kontribusi pembangkit pada aliran daya. Penyederhanaan sistem tenaga pada grafik *state*, serta persamaan *recursive* untuk menyelesaikan daya aktif dan reaktif pada kontribusi setiap pembangkit untuk masing-masing beban[4]
- 3) Teori grafik. Merupakan faktor kontribusi yang dihitung untuk menetapkan kontribusi daya aktif dan reaktif setiap generator pada setiap jaring dan beban[6]-[8].

Di industri tenaga listrik tradisional, pengaturan sederhana dan juga sistem dijalankan dengan cara memperkecil keseluruhan biaya. Peramalan beban dapat dilakukan dalam periode harian, mingguan, dan bulanan dilaksanakan. Studi aliran daya, analisis biaya dan penjadwalan ekonomis pembangkit dibuat terlebih dahulu dari waktu yang ditetapkan. Karena itulah semua pembangkitan dan distributor berada di bawah satu payung. Dalam hal ini perencana tidak mempertanggungjawabkan ke individu pembangkit dan distribusi, tetapi ke pemiliknya atau hanya ke pemerintah. Dalam operasi *real time*, penjadwalan pembangkit dan pengiriman beban dibuat sebelum perencanaan. Penggunaan cadangan berputar (*spinning reserve*) untuk memenuhi permintaan aktual atau memenuhi keadaan darurat sangat jarang dilakukan oleh mereka. Operator sistem mengambil semua keputusan untuk menjamin keamanan dan reliabel menurut beberapa kriteria yang ditentukan.

Aktivitas perencanaan dan operasi dalam deregulasi sistem tenaga jauh lebih kompleks dibandingkan sistem tradisional. Salah satu kompleksitas timbul berkaitan dengan fakta, bahwa energi listrik dapat dibangkitkan dan dikonsumsi pada waktu yang sama. Ketika permintaan beban dinaikkan, salah satu atau setiap pembangkit ditingkatkan untuk memenuhi beban atau beban yang dibatasi. Beban pada jaringan berubah setiap jam, untuk menjadi lebih spesifik lagi berubah setiap saat.

Mengingat beban dikontrol oleh distributor, maka peramalan beban sangatlah sulit.

Pembelian daya tidak bergantung pada pengecer dari operator sistem. Di banyak kasus, lama perencanaan misalnya mingguan atau bulanan menjadi sangat sulit dan tidak akurat. Banyak keputusan diambil berdasarkan *real time* atau beberapa menit sebelumnya. Perencanaan transmisi menjadi sulit karena spot penjualan daya. Sebagian besar distributor ingin membeli daya dari penyalur termurah yang menyebabkan transmisi buntu. Manajemen buntu menjadi isu perdebatan yang besar di dalam sistem deregulasi. Alokasi kerugian transmisi merupakan isu perdebatan lainnya. Estimasi total kerugian transmisi tidak cukup, yang mana harus dialokasikan ke individual generator dan beban.

Dalam hal ini kita hendak membahas tentang alokasi rugi-rugi transmisi dan alokasi biaya daya reaktif pada masing-masing bus. Bagaimanapun juga, dalam prosesnya tidak akan memperhatikan aspek pada daya aktif sebab transaksi bilateral pada daya aktif akan berlangsung setelah liberalisasi industri tenaga listrik. Misalnya transaksi daya yang efektif akan dicapai melalui penetapan pembeli dan penjual. Oleh sebab itu, sumber dan arah daya aktif telah ditetapkan, setidaknya pada asumsi buatan.

Perbedaan daya reaktif merupakan hasil pengiriman sistem tenaga dan tidak ada dalam transaksi bilateral. Daya reaktif dapat disuplai oleh generator sinkron, motor sinkron, dan kapasitor. Kondisi ini membuat biaya yang dihitung menjadi bervariasi. Perbedaan biaya atau penawaran harga dipengaruhi oleh penyuplai dan lokasi. Selain itu, daya reaktif tidak dapat langsung *off* dan beban akan sama dengan permintaan daya reaktif. Misalnya hasil pada sumber berbeda, yang membuat biaya secara alami juga berbeda. Tambahan untuk prinsip keadilan perlu dilakukan identifikasi sumber daya reaktif di setiap beban dan menghitung biaya. Karena itulah dalam hal ini kita akan banyak membahas tentang penentuan biaya daya nyata. Seperti untuk persoalan rugi jaringan, termasuk daya aktif dan reaktif, rugi-rugi tersebut dibagi

oleh pemakai. Daya reaktif pada bus beban adalah permintaan konsumsi dan daya reaktif dan rugi jaringan dari pemakaian jaringan transmisi, walaupun keduanya memiliki sifat fisik sama.

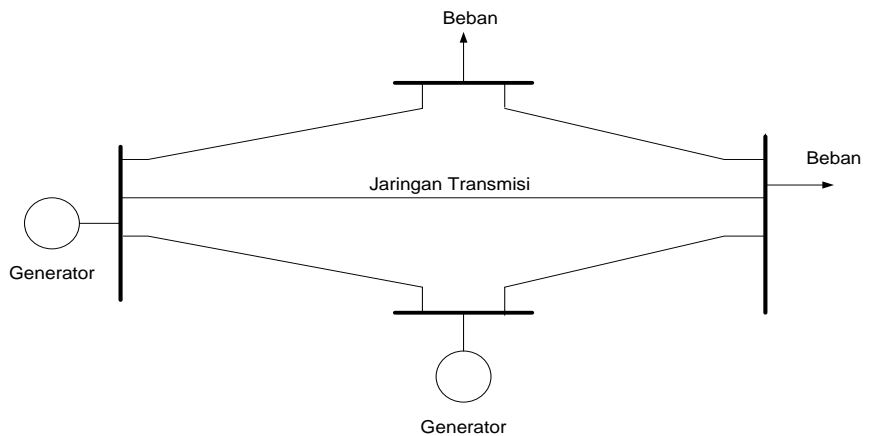
Metode alokasi daya reaktif didasarkan pada salah satu prinsip dasar teori rangkaian. Bagian setiap beban pada bus tegangan diberikan oleh semua sumber tegangan pada rangkaian. Oleh karena itu, di sini penulis menyimpulkan, bahwa fungsi hubungan yang baik *Load Voltage* (VL) dan *Generator Voltage* (VG), yaitu $VL = f(VG)$, untuk keluaran kuantitas pada komponen tegangan ΔVL dibuat pada semua tegangan beban. Dalam hal ini penulis juga menggunakan komponen tegangan ΔVL di setiap tegangan beban. Kemudian arus beban diketahui dari hasil analisis aliran daya untuk memperoleh daya reaktif pada setiap beban diperoleh dari masing-masing pembangkit. Setelah itu baru biaya daya reaktif yang diperoleh dari penawaran pada bursa pasar listrik kita hitung.

Pada intinya, bagian ini kita akan mengetahui alokasi rugi-rugi transmisi dengan metode aplikasi aliran daya menggunakan metode Z-bus. Selain itu juga tentang alokasi daya reaktif menggunakan metode modifikasi matriks Y-Bus. Termasuk alokasi kerugian transmisi dan alokasi biaya reaktif pada pemasangan peralatan atau layanan tambahan secara langsung menggunakan metode aplikasi Z bus dan modifikasi Matriks Y-Bus.

Penulis berharap pembahasan kali ini dapat digunakan untuk referensi dalam mengatasi deregulasi tenaga listrik, khususnya alokasi kerugian transmisi dan alokasi biaya daya reaktif pada pemasangan peralatan atau layanan tambahan secara adil di masing-masing pembangkit dan beban. Perlu dipahami bersama bahwa penulis membatasi pembahasan kali ini, bahwa aliran daya ditentukan dengan metode Newton-Raphson. Data yang digunakan adalah data pembangkit, data bus, dan data saluran pada sistem IEEE 30 bus.

Rugi-Rugi Transmisi dalam Operasi Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga listrik secara umum dibagi menjadi tiga bagian utama yaitu pembangkit, jaringan transmisi, dan beban. Hal ini dapat dilihat dari diagram satu garis sistem tenaga listrik multi mesin pada gambar di bawah ini. Pembangkit dapat berasal dari tipe pembangkit yang berbeda seperti tenaga uap, air, nuklir angin, panas matahari, diesel, panas bumi, gas dan lain sebagainya.



Gambar 5.1. Diagram Sistem Tenaga Listrik

Pada saat *starting* pembangkit bervariasi, mulai dari beberapa menit hingga beberapa hari, sebagian pembangkit mampu merespons perubahan beban dengan cepat, sementara sebagian lainnya memerlukan banyak waktu untuk merespons perubahan beban. Biaya bahan bakar pembangkit ini juga sangat bervariasi. Operator sistem umumnya menggunakan unit pembangkit yang tersedia secara efisien dan optimal. Pembebanan suatu jaringan dapat berubah-ubah setiap hari dan juga di berbagai musim. Operator sistem tenaga listrik menggunakan semua faktor ini sebagai pertimbangan sebelum mengoperasikan sistem dengan jumlah biaya yang paling sedikit.

Pembebanan suatu jaringan mengikuti beberapa pola tinggi dan rendah dengan pengaturan waktu berbeda. Peramalan beban diprediksi

secara alami dari pola beban dan dari peristiwa atau arsip sebelumnya secara teliti. Dari prediksi ini, operator sistem menentukan jumlah unit pembangkit yang diperlukan untuk memenuhi permintaan. Aktivitas pengoperasian sistem tenaga yang penting ini biasa dikenal sebagai *unit komitmen*. Unit komitmen mengatur jumlah unit pembangkit agar berada di kondisi berputar (*spinning*) untuk memenuhi permintaan untuk 24 jam. Biaya produksi unit tergantung pada prinsip kerja dan bahan bakar yang digunakan. Contohnya adalah biaya produksi dari unit air (*hidro*) yang mana kurang lebih sama dengan turbin uap dan gas.

Biaya produksi dan prinsip kerja unit pembangkit, rugi-rugi transmisi adalah suatu hal yang berperan penting dalam pengambilan keputusan bagaimana unit dioperasikan dan dibebani. Kerugian transmisi tidak bisa dihindarkan dari fakta bahwa semua saluran transmisi dan distribusi memberi resistansi ke aliran arus yang melaluinya.

Rugi-rugi transmisi dalam sistem tenaga listrik termasuk dalam peristiwa alami. Tenaga listrik harus dipindahkan dari tempat pembangkit ke tempat konsumen melalui beberapa jaringan untuk dikonsumsi. Semua kawat saluran memiliki resistansi yang mengkonsumsi beberapa daya. Daya yang dikonsumsi dengan cara ini dikenal dengan istilah "*kerugian*". Sebagian besar kerugian ini berkaitan dengan panas pada saluran listrik oleh arus listrik yang melalui penghantar tersebut. Kerugian (I^2R) merupakan kehilangan daya pada jaringan. Kerugian transmisi mewakili 5% sampai 10% total pembangkitan, yang mana bernilai jutaan dolar setiap tahun.

Kerugian daya dalam suatu jaringan transmisi dan distribusi dipengaruhi oleh beberapa faktor sebagai berikut.

- 1) lokasi pembangkit dan beban;
- 2) jenis beban yang dihubungkan;
- 3) bentuk atau konfigurasi jaringan;
- 4) level tegangan dan tegangan tidak seimbang;
- 5) faktor dinamis yang berhubungan operasi sistem AC yang besar (faktor daya, harmonisa dan kontrol daya aktif dan reaktif);

- 6) panjang jaringan adalah hubungan yang hampir linier (yakni panjang jaringan ganda baris akan menggandakan kerugian jaringan);
- 7) desain jaringan bentuk, terutama ukuran, material dan jenis kabel; dan
- 8) jenis trafo dan pembebanan.

Di dalam sistem tenaga tradisional, total kerugian transmisi dioptimalkan dari pemeliharaan dan *running* pada biaya yang minimum. Suatu deregulasi sistem tenaga yang berkaitan dengan kompetisi sektor pembangkit memiliki kerugian transmisi harus dialokasikan ke individu pembangkit.

Rugi-rugi transmisi terdiri atas dua komponen, yakni komponen aktif dan reaktif. Keduanya perlu dinilai dengan baik untuk kestabilan dan keamanan sistem tenaga. Teknik aliran daya AC, ekspresi kerugian transmisi, persamaan Kron'S dan sebagainya digunakan untuk menilai rugi-rugi transmisi. Teknik aliran daya AC merupakan cara yang paling kuat dan populer, sebab ia memperlihatkan semua aliran daya, rugi-rugi saluran dan level tegangan di semua bus di dalam sistem[23], [28]-[29].

Beberapa metode alokasi kerugian yang sudah banyak digunakan antara lain *pro rata*, *incremental transmission loss* (ITL), *proportional sharing*, *loss formula*, *Incremental bilateral contract path*, *Z-Bus Loss Allocation*, *tracing methodology*, *direct use of sensitivity coefficient*, *based on power flow analysis*, dan *integration of sensitivity coefficient* [1]-[13], [16],[20],[31],[36]-[37].

- **Metode Pro Rata**

Pro rata merupakan salah satu metode paling umum. Alokasi komponen kerugian didasarkan pada bus pembangkit atau level daya aktif pada bus beban, namun bukan penempatan pada lokasi yang bersesuaian dengan jaringan. Hasilnya, pembangkit sedikit ditempatkan untuk permintaan yang menguntungkan semua biaya lain. Contoh pasar listrik yang menggunakan metode alokasi kerugian pro rata bisa ditemukan di Spanyol dan Inggris dan Wales [10],[40].

- **Metode *Incremental Transmission Loss (ITL)***

Alokasi rugi transmisi berdasarkan ITL memerlukan dua besaran vektor, yakni Parameter rugi-rugi suplai dan distribusi beban. Tidak diketahui secara pasti salah satu dari parameter ini sehingga metode ini tidak dapat menghitung pembagian alokasi. Alhasil, studi aliran daya perlu diketahui. Dengan metode ITL, kita dapat menentukan alokasi kerugian transmisi antar pembangkit dan beban. Analisis ITL telah digunakan pada beberapa tahun terakhir ini dan sudah diterapkan di negara Norwegia, U.K dan Spanyol [7], [10],[40].

- **Metode *Proportional Sharing***

Metode *Proportional Sharing* menyediakan prosedur perhitungan tertentu yang efisien untuk alokasi kerugian. Bagaimana pun juga, hanya Hukum Kirchhoff pertama yang dipakai dengan asumsi tambahan, yakni prinsip *proportional sharing*. Dalam asumsi ini, aliran yang masuk secara proporsional sama dengan aliran yang keluar pada tiap-tiap titik jaringan. Rugi-rugi dialokasikan untuk bus pembangkitan sesuai dengan bus permintaan (beban) secara linier akan dialokasikan 50% ke unit-unit pembangkit dan 50% kepada unit-unit beban [4], [10],[40].

- **Metode *Loss Formula***

Loss formula merupakan metode praktis untuk menghitung kerugian, termasuk peningkatan kerugian (*incremental loss*). Metode loss formula dikenal dengan *loss formula Kron's* yang berasal dari beberapa asumsi sebagai berikut.

- a) Berhubungan linier antara daya aktif dan reaktif pada semua pembangkit, yang dapat ditentukan oleh

$$Q_{Gi} = Q_{Gi0} + f_i P_{Gi}$$

- b) Generator konstan pada posisi δ_i
- c) Besar tegangan bus generator konstan
- d) Suatu penetapan pola permintaan ditentukan oleh matriks berikut

$$[Q_{G0}] = \text{col}[Q_{Gi0}]$$

$$[F] = \text{diag}(f_i), f_i \text{ adalah konstan}$$

- **Incremental Bilateral Contract Path**

Pada konteks kontrak bilateral, beberapa metode alokasi kerugian sudah dikemukakan. Estimasi dialokasikan untuk respons dan perkiraan kerugian urutan kedua. Dalam hal ini perkiraan kurang baik apabila jarak elektrik antara peserta kontrak bernilai kecil. Perumusan perkiraan *Quadratic loss* digunakan dalam koordinasi model perdagangan multilateral, yang akhir-akhir ini menyatakan *loss formula* memiliki kaitan dengan transaksi injeksi. Metode ini mengasumsikan sendiri bus *slack* dari kerugian dihitung dan dibagi-bagikan dengan transaksi. Rencana penggabungan di antara komponen yang muncul di dalam kerugian jaringan dapat dialokasikan ke transaksi individu dari dua belah pihak. Masing-masing transaksi bilateral boleh memilih kerugian dari suatu generator *slack* yang terpisah.

Kesulitan utama dalam alokasi rugi-rugi pada beban, generator, atau kontrak bilateral ialah mengabaikan pendekatan, di mana alokasi yang akhir selalu berisi derajat tingkat kesewenangan tertentu. Kondisi ini berkaitan dengan kerugian transmisi sistem yang tidak terpisah. Fungsi nonlinear pada bus injeksi daya dinilai mustahil untuk membagi kerugian sistem ke dalam syarat penjumlahan. Masing-masing atribut secara khusus dapat dihubungkan dengan suatu pembangkit atau beban. Artinya, isu yang wajar mungkin tidak pernah dipecahkan secara penuh dengan metode alokasi kerugian ini.

Meskipun begitu, untuk mengidentifikasi sejumlah karakteristik dalam suatu rencana alokasi kerugian yang dapat disangkal, diperlukan rencana yang efisien. Karakteristik ini juga bermanfaat untuk membandingkan berbagai pendekatan yang diusulkan oleh banyak literatur. Secara umum, komponen kerugian yang dialokasikan di antara bus pembangkit dan bus beban sebaiknya memperhatikan beberapa hal sebagai berikut.

- a) Refleksi magnitudo daya atau injeksi arus pada tiap bus.
- b) Refleksi posisi sesuai dengan bus dalam jaringan.
- c) Refleksi kedua topologi jaringan dan tegangan-arus yang berhubungan.
- d) Mudah dipahami dan diimplementasikan.
- e) Melengkapi insentif yang efektif atau disinsentif ke generator dan beban dengan respek sesuai dengan lokasi dan magnitudo jaringan.
- f) Konsisten dengan penyelesaian aliran daya tertentu.

- **Z -Bus Loss Allocation**

Metode *Z-Bus Loss Allocation* didasarkan pada matriks Z-Bus jaringan. Salah satu karakteristik dan kelebihan inovatif metode ini ialah mengeksplorasi rangkaian penuh persamaan jaringan, serta tidak membutuhkan asumsi sesederhana apapun. Metode ini didasarkan pada satu aliran beban yang terpecahkan, mudah dipahami, dan juga diimplementasikan. Proses alokasi kerugian menekankan pada injeksi arus, bukan injeksi daya. Ini merupakan satu pendekatan yang secara intuisi masuk akal dan menghasilkan pemisahan yang wajar atas kerugian sistem di antara bus jaringan [10].

- **Metode Tracing**

Metode *tracing* dapat diketahui sebagai gabungan antara proses *pricing marginal* yang optimal secara ekonomi dan teknik *pricing* yang rata-rata sederhana. Hal ini dapat dihubungkan dengan salah satu *noncyclic directed graph (digraph)* pada aliran atau penyelesaian persamaan linier.

- **Metode Direct Use of Sensitivity Coefficients**

Secara konvensional, banyak pemakaian listrik mengadopsi alokasi rugi didasarkan pada faktor *incremental* dan atau biaya marginal, yang relatif mudah dihitung. Nodal faktor koefisien diperoleh dari pendekatan linier pada persamaan rugi daya dengan respek pada bus injeksi daya aktif dan daya reaktif. Tiap-tiap istilah pada pendekatan linier mendefinisikan bagian pada kenaikan kerugian yang dialokasikan ke bus yang sesuai.

Perhitungan hubungan sensitivitas dilakukan untuk alokasi kerugian serta menilai partisipasi bus pada sistem transmisi yang digunakan. Umumnya, faktor *incremental* transmisi yang paling besar dihubungkan dengan bus secara listrik jauh dari pusat pembangkit. Meskipun begitu, faktor ini mudah untuk menghitung, dan tipe strategi alokasi rugi ini dapat sewenang-wenang atau diskriminasi.

Penentuan faktor rugi melalui dekomposisi pada pengali *Lagrange*, di mana suatu masalah aliran daya optimal diselesaikan untuk minimalisasi biaya pembangkitan daya aktif, dari biaya marginal yang diperoleh. Untuk menghitung nodal faktor rugi, biaya marginal didekomposisi ke dalam patokan yang sesuai dengan biaya pada suplai energi, rugi transmisi daya aktif, dan juga kongesti. Hal ini diperkirakan, bahwa biaya marginal pada bus referensi λ_r , dan hanya inklud pada suplai daya dan kerugian.

Asumsi tentang biaya marginal pada bus referensi menunjukkan, bahwa pemilihan bus ini pantas untuk dipertimbangkan dalam alokasi kerugian. Bagaimanapun hal ini akan memungkinkan sebelum memilih set bus pembangkitan untuk menyuplai rugi transmisi (*slack* bus didistribusikan). Prosedur alokasi kerugian berdasarkan metode ini meliputi beberapa langkah sebagai berikut.

- 1) Menentukan penyelesaian *Optimal Power Flow* (OPF) untuk mengurangi kerugian daya aktif transmisi dari biaya marginal produk;
- 2) Mengevaluasi bagian biaya marginal yang relatif dengan kerugian transmisi untuk ditambahkan ke Persamaan (2.11);
- 3) Menghitung nodal faktor partisipasi kerugian oleh skala pembagian biaya marginal yang berkaitan dengan kerugian, misalnya hasil dengan mencocokkan total nilai injeksi daya nyata pada kerugian daya aktif transmisi.

Kerugian daya aktif transmisi meningkatkan fungsi permintaan daya aktif. Dari kondisi ini dapat dipastikan, bahwa bagian *non-negative* kerugian diperoleh dari semua bus. Biaya marginal bersesuaian dengan sensitivitas terhadap kerugian daya dan respek pada injeksi daya.

Metode ini terikat dalam formulasi OPF. Karena itulah, hanya ada pengali Lagrange untuk persamaan keseimbangan daya yang termasuk pada set konstrain persamaan. Hal ini secara fleksibel dapat memenuhi syarat untuk memilih bus di mana kerugian dibagi. Upaya perhitungan dilakukan untuk memperoleh solusi OPF yang moderat sehingga mendorong aplikasi teknik alokasi ini.

- **Metode Alokasi Kerugian Berdasarkan Analisis Aliran Daya**

Analisis dengan hati-hati dan ekstensi pada solusi *steady state* persamaan jaringan power memberikan kita dasar untuk tipe metode alokasi kerugian yang lain. Strategi tipe ini mendirikan *range* literatur dari dekomposisi pada aliran jaringan transmisi dengan matriks impedansi dan injeksi arus bus.

Konsep utama analisis aliran daya tentang daerah dan link berkaitan dengan unit pembangkit. **Pertama;** menetapkan set bus beban yang disuplai oleh pembangkit (daerah pembangkit). Hal ini diklasifikasikan berdasarkan jumlah unit pembangkit yang dihubungkan pada daerah tersebut. **Kedua;** menunjuk lokasi jaringan transmisi keluar batas pada daerah pembangkit yang berbeda. Kerugian ini dapat dibagi secara proporsional di antara pembangkit menurut partisipasi mereka dalam jaringan transmisi daerah mereka sendiri.

Aplikasi metode ini sederhana. Kesulitan muncul saat mengevaluasi bagian real pada matriks impedansi bus. Karena itulah direkomendasikan teknik *sparsity* (pemisahan). Kekurangan secara fleksibel atribut kerugian hanya untuk bus pembangkitan (atau beban alternatif), atau menentukan pembagian yang merata pada kerugian yang dibagi oleh konsumen dan produsen.

- **Metode Alokasi Melalui *Integration of Sensitivity Coefficients***

Pengali Lagrange sesuai dengan solusi OPF, yakni untuk memperkecil kerugian daya. Seperti halnya pada faktor kenaikan kerugian transmisi suatu titik operasi yang diinterpretasikan sebagai urutan pertama hubungan sensitivitas antara rugi daya aktif transmisi dan bus

injeksi daya aktif. Semua ini mengacu pada kenaikan yang sangat kecil dan perlu digabungkan.

Ada dua tipe pendekatan berdasarkan integrasi hubungan sensitivitas pada literatur. Pertama, faktor kerugian dari penggabungan koefisien kenaikan rugi transmisi. Kedua adalah alternatif koefisien distribusi rugi yang sangat kecil sehingga bisa dievaluasi dalam suatu rentetan penyelesaian aliran daya konvensional. Rugi transmisi dapat juga dilihat sebagai masalah alokasi biaya yang umumnya dinyatakan dalam bentuk membagi biaya fasilitas bersama-sama yang digunakan antar peserta dalam suatu usaha kerja sama.

Daya Reaktif dalam Sistem Tenaga Listrik

Alokasi Daya Reaktif

a) Teori *Graph*

Teori *Graph* merupakan teori yang cukup baik, khususnya untuk mengatasi masalah topologi jaringan. *Vertice* dari *graph* merupakan bus pada sistem dan *Edges* dari *graph* adalah saluran transmisi dan transformator. Arah dari *Edges* merupakan arah dari aliran daya. Arah dari aliran daya aktif dapat berbeda dari arah aliran daya reaktif pada saluran transmisi yang sama.

Untuk menyederhanakan masalah, beberapa asumsi yang dapat digunakan adalah sebagai berikut.

- 1) Hasil aliran daya AC tersedia berasal dari *online state estimation* atau *off-line system analysis*. Sistem dapat dijalankan secara sempurna dan tidak ada *loop flow* pada sistem.
- 2) Daya aktif dan reaktif memerlukan resistansi saluran, reaktansi dan kapasitansi transmisi yang harus sudah dipindahkan ke bus terminal dan dimodelkan sebagai beban ekuivalen didasarkan pada hasil aliran daya. Sebab itulah aliran daya aktif dan reaktif pada saluran dijaga konstan sepanjang saluran. Masing-masing ujung memiliki arah yang pasti dan jaringan dianggap tidak mempunyai rugi-rugi daya.

- 3) Generator memiliki prioritas untuk memberi daya ke beban pada bus yang sama. Daya yang tersisa dimasukkan ke jaringan untuk menyuplai beban lainnya pada jaringan sehingga rugi-rugi daya yang tidak perlu dapat dihindari. Ini cocok untuk kontrak transaksi pada generator yang tidak menjual listrik ke beban lokal sebab kelistrikan ini tidak memiliki label dan sistem operator yang berwenang mengirim (*dispatch*) aliran daya. Oleh karena itu, bus pada jaringan dapat diklasifikasi sebagai bus generator, bus beban, dan bus jaringan berdasarkan injeksi mereka terhadap sistem. Konsep ini dapat diaplikasikan untuk aliran daya aktif dan reaktif.
- 4) Aliran listrik mengacu pada proporsional *sharing rule* [6],[32],[35].

b) Modifikasi Matriks Y-Bus

Metode alokasi daya reaktif yang diusulkan ini didasarkan pada satu teori rangkaian, di mana bagian setiap beban pada bus tegangan diberikan oleh semua sumber tegangan pada rangkaian. Oleh karena itu, fungsi hubungan yang digunakan ialah *Load Voltage (VL)* dan *Generator Voltage (VG)*, yaitu $VL = f(VG)$, untuk keluaran kuantitas pada komponen tegangan ΔVL dibuat ke atas pada semua tegangan beban. Termasuk juga penggunaan komponen tegangan ΔVL pada setiap tegangan beban dan arus beban berdasarkan hasil analisis aliran daya untuk memperoleh daya reaktif setiap beban yang diperoleh dari masing-masing pembangkit [1]-[4][33]-[35].

Kompensasi Daya Reaktif

Kemampuan kerja saluran transmisi dapat diperbaiki menggunakan kompensasi reaktif jenis seri atau paralel. Kompensasi seri terdiri atas bank kapasitor yang dihubungkan seri dengan masing-masing penghantar fasa saluran. Bank kapasitor di sini merupakan instalasi beberapa kapasitor yang dihubungkan secara paralel.

Kompensasi *shunt* merupakan penempatan bangku kapasitor *shunt* rel-rel baik pada tingkat transmisi maupun distribusi, di sepanjang saluran atau stasiun pembantu dan beban. Kapasitor merupakan alat untuk

mencatur daya reaktif (VAR) pada titik pemasangannya. Apabila terhubung paralel dengan beban yang mempunyai faktor daya tertinggal, kapasitor merupakan sumber dari sebagian atau bahkan seluruh daya reaktif beban. Artinya, kapasitor memperkecil arus saluran yang diperlukan untuk mencatu beban serta mengurangi jatuh tegangan pada saluran, sedangkan faktor daya diperbaiki. Oleh karena kapasitor mengurangi kebutuhan daya reaktif pada generator, hasil keluar daya nyata yang tersedia bertambah besar. Kondisi ini dianggap lebih efektif dalam meningkatkan kapabilitas transfer daya pada sistem dan meningkatkan stabilitas tegangan. Ini diinginkan kedua secara ekonomi dan teknik untuk operasi sistem mendekati faktor daya satu. Selain meningkatkan performansi sistem untuk beroperasi pada kondisi seimbang, kondisi ini juga mampu mereduksi aliran arus urutan negatif, sehingga kapabilitas beban meningkat dan rugi-rugi pada sistem dapat tereduksi.

Berikut beberapa manfaat pemasangan kapasitor *shunt*.

- (1) Menjaga kVAR beban induktif agar berada pada batas yang ditentukan.
- (2) Menghindari jaringan dari *overload*, seperti trafo kelebihan batas kVA.
- (3) Menghindari generator dari pembangkitan MVAR yang berlebihan.
- (4) Mengurangi kerugian I^2R pada jaringan.
- (5) Mengurangi kerugian I^2X pada jaringan.
- (6) Memperbaiki regulasi tegangan.

Mereduksi rugi-rugi daya dapat dilakukan dengan beberapa metode sebagai berikut.

- (1) Menggunakan kapasitor dan reaktor;
- (2) Tap *changers* trafo;
- (3) Mengatur dan kontrol *Power Flow* dengan metode rekonfigurasi dan *Optimal Power Flow*;
- (4) Metode manajemen sisi permintaan; serta
- (5) Pengukuran peningkatan sistem efisiensi[17]

Daya reaktif yang dibutuhkan peralatan listrik dapat disuplai dari kapasitor *shunt*. Kondisi ini mengeliminasi aliran daya reaktif dari pusat pembangkit, sehingga rugi-rugi transmisi dapat tereduksi [18],[29],[36].

Biaya Daya Reaktif

1) Biaya Daya Reaktif pada Transmisi

Faktor daya merupakan parameter utama untuk memecahkan kompensasi daya reaktif. Kompensasi ini bisa dilakukan melalui penggunaan kapasitor statik. Kapasitor dengan daya aktual sangat sedikit digunakan untuk memproduksi daya reaktif. Termasuk juga mengabaikan kenaikan bahan bakar yang dikonsumsi pembangkit dalam menghitung produksi daya reaktif. Artinya, daya reaktif dapat ditandai oleh adanya kerugian transmisi. Untuk konsumen sendiri, permintaan daya reaktif direfleksikan pada faktor daya yang rendah. Ini merupakan pengganti untuk menghitung banyaknya biaya untuk memproduksi banyaknya daya reaktif. Salah satunya ialah menghitung kembali investasi kapasitor, dari penghematan penalti dan dari reduksi *charges* permintaan maksimum. Dari sisi *utility*, investasi dijustifikasi dari reduksi kerugian dari *release* energi. Perhatian utama pengiriman daya reaktif ialah meminimalisasi rugi-rugi pada transformator dan sistem transmisi.

Umumnya biaya-biaya komponen transmisi terdiri dari beberapa hal sebagai berikut.

- a. *Operating Cost*, berkaitan dengan generator *re-dispatch* dan penjadwalan ulang dari transaksi transmisi.
- b. *Loss of Opportunity Cost*, merupakan manfaat *utility* yang membatalkan batasan operasi (pembangkit lebih murah tidak dapat digunakan)
- c. *Reinforcement Cost*, merupakan *capital cost* fasilitas yang baru dan hanya dibebankan ke transaksi perusahaan.
- d. *Existing System Cost*, merupakan *capital cost* dan biaya tetap sebagai biaya fasilitas yang ada.

Sedangkan biaya eksplisit untuk transmisi adalah sebagai berikut.

- a. *capital cost*

- b. biaya rugi-rugi transmisi
- c. biaya *capasitor bank*
- d. biaya trafo dengan tap *changers* beban
- e. biaya pemeliharaan

Biaya marginal transmisi yang merupakan akibat dari *capital cost* dikalkulasi similar dengan pembangkitan. Biaya rugi-rugi transmisi tinggi tidak dapat diabaikan. Ia akan meningkat ketika level tegangan tidak dirawat oleh transmisi. Tidak hanya itu, tegangan yang rendah juga meningkatkan rugi-rugi pada pembangkit [17].

2) **Fixed Costs (Biaya-Biaya yang Tetap)**

Biaya-biaya tetap peralatan daya reaktif secara langsung hanya untuk mengatur daya reaktif, yang mana lebih sedikit untuk generator. Masalah muncul pada generator yang dibangun untuk menyediakan daya aktif dan daya reaktif, sementara bagian peralatan yang sama di dalam suatu generator mungkin menyediakan dua-duanya, baik secara simultan maupun tidak.

Sebagai konsekuensi, beberapa metode diusulkan untuk mengukur porsi biaya kapital pembangkit yang sesuai dengan daya reaktif, sebagai berikut.

- a. *Incremental Cost* atau penetapan biaya daya reaktif merupakan perbedaan antara biaya pembangunan pabrik (*plant*) dengan dan tanpa margin reaktif, serta biaya dari peralatan yang diperlukan menggunakan margin itu sendiri.

$$CC_{kVAr}^{gen} = CC_{kVA}^{gen} - CC_{kW}^{gen}$$

CC_{kVAr}^{gen} merupakan biaya capital generator untuk menyediakan daya reaktif, CC_{kVA}^{gen} total biaya capital generator termasuk kapabilitas daya reaktif, dan CC_{kW}^{gen} total biaya capital generator yang tidak termasuk kapabilitas daya reaktif.

- b. *The cost of synchronous condenser* sebagai “wakil penilaian”. Biaya kapasitas per kVAr antara tipikal *synchronous compensator* dan

tipikal generator nantinya digunakan sebagai biaya kapasitas daya reaktif yang dinilai dengan menghindari biaya pembangunan instalasi baru. Mengingat produksi daya reaktif oleh generator sama dengan *synchronous condenser*, maka biaya untuk menyuplai daya reaktif oleh *synchronous condenser* akan sama dengan biaya suplai daya reaktif dari generator.

$$CC_{kVAr}^{gen} = \frac{CC_{kVAr}^{syncon} * CAP_{kVAr}^{gen}}{CAP_{kVAr}^{syncon}}$$

CC_{kVAr}^{syncon} adalah biaya capital *synchronous condenser*, CAP_{kVAr}^{gen} adalah biaya generator kapabilitas daya reaktif, dan CAP_{kVAr}^{syncon} adalah biaya *synchronous condenser*

- c. *Ratio of kVAr to kVA*. Biaya-biaya kapasitas daya reaktif per kVAr sama dengan biaya-biaya daya reaktif per kVA dikalikan kapasitas kVar, lalu dibagi kapasitas kVA. Suatu Penyesuaian tertentu mungkin diperlukan untuk merefleksikan dengan akurat perubahan nyata di dalam biaya-biaya capital *plant* yang dihubungkan dengan operasi faktor daya *lagging*. Sebagian biaya-biaya eksiter dan generator ditentukan melalui perbandingan *output* daya reaktif kepada total daya, yang dialokasikan terhadap jasa daya reaktif.

$$CC_{kVAr}^{gen} = \frac{CC_{kVA}^{gen} * CAP_{kVAr}^{gen}}{CAP_{kVA}^{gen}}$$

CAP_{kVA}^{gen} adalah kapabilitas daya aktif generator

- d. *One minus the ratio of kW to kVA*. Kapasitas biaya daya reaktif sama dengan total biaya kapasitas dikali satu kurang perbandingan rating kW generator dengan rating kVA.

$$CC_{kVAr}^{gen} = CC_{kVA}^{gen} * \left(1 - \frac{CAP_{kW}^{gen}}{CAP_{kVA}^{gen}} \right)$$

CAP_{kW}^{gen} adalah kapabilitas daya aktif generator

e. *Triangle method (metode segitiga)*. Biaya dari porsi generator digunakan untuk menyediakan *support* tegangan dan reaktif yang mana perlu mencakup suatu porsi yang dialokasikan pada biaya generator dan eksiter untuk setiap unit yang memproduksi VAr, seperti halnya porsi tertentu yang dialokasikan terhadap daya yang dikonsumsi oleh generator dan eksiter. Porsi kVA sama dengan akar kuadrat pada perbedaan antara kVA^2 dan kW^2 . Karena itulah hanya porsi reaktif pada total investasi generator dan eksiter di dalam unit yang dialokasikan ke layanan ini. Alokasi porsi daya yang dikonsumsi oleh generator dan eksiter pada setiap unit harus termasuk *charge* untuk layanan ini. Alokasi yang sama digunakan untuk investasi yang sudah dipaparkan di atas, dan juga biaya kapasitas, serta energi pada unit untuk kalkulasi kapasitas konsumsi sekaligus konsumsi energi yang dialokasikan kepada layanan ini. Total komponen ini selanjutnya dibagi oleh masing-masing puncak dalam rangka mengembangkan unit *charge* [19].

$$CC_{kVA}^{gen} = CC_{kVA}^{gen} * \frac{\sqrt{(CAP_{kVA}^{gen})^2 - (CAP_{kW}^{gen})^2}}{CAP_{kVA}^{gen}}$$

f. *Cooperative game theory*. Alokasi masing-masing produk paling sedikit untuk porsi yang dapat dipisahkan pada total biaya untuk memproduksi masing-masing produk dan paling banyak biaya-biaya alternatif untuk memproduksi produk individu sendiri [21],[32].

$$CC_{kVA}^{gen} - CC_{kW}^{gen} \leq CC_{kVA}^{gen} \leq \frac{CC_{kVA}^{syncon} * CAP_{kVA}^{gen}}{CAP_{kVA}^{syncon}}$$

Metode a diterapkan untuk menaksir biaya-biaya daya reaktif secara langsung dari informasi generator, sedangkan metode b mencoba untuk menyimpulkan nilai layanan daya reaktif generator untuk biaya sumber daya reaktif yang lain. Sementara metode c sampai e merupakan tiga pendekatan untuk menggunakan kapasitas daya aktif dan reaktif relatif agar biaya-biaya relatif mereka dapat disimpulkan.

3) Variable Costs

Hanya sedikit sumber yang menyatakan, bahwa biaya-biaya variabel peralatan daya reaktif hanya mengatur daya reaktif. Biaya-biaya variabel kapasitor *shunt* dan reaktor terbatas pada rugi-rugi energi untuk turunnya nilai di dalam hasil operasi *switching*.

Beberapa sumber lebih berkaitan dengan biaya-biaya variabel daya reaktif dari generator. Sebagian besar biaya variabel berkaitan dengan rugi-rugi daya aktif pada generator dan trafo step up akibat daya reaktif. Dalam hal ini diperlukan pertimbangan peluang biaya untuk memproduksi daya aktif yang hilang berkaitan dengan kebutuhan untuk memproduksi daya reaktif.

Sebagai perbandingan, penyediaan suatu contoh yang menunjukkan bagaimana peningkatan pada *output* daya reaktif generator boleh memerlukan suatu reduksi yang menemani *output* daya aktif generator. Termasuk tentang bagaimana menciptakan peluang biaya untuk pembangkitan daya reaktif. Mereka juga menunjukkan, bahwa transaksi bilateral membutuhkan *support* tegangan pada seluruh lokasi sistem tenaga listrik, yang mana tidak hanya pada titik-titik pengambilan dan injeksi daya [19], [30].

Sistem Deregulasi

Tenaga Listrik Tradisional

Berawal dari utilitas jaringan sangat kecil, utilitas listrik dewasa sudah meningkat sampai jutaan kali lebih besar. Saat ini sistem tenaga listrik sudah kompleks dan tersebar luas secara alami. Beberapa ratus tahun terakhir sistem tenaga listrik bahkan sudah bisa dioperasikan dan diatur secara monopoli. Dalam sistem monopoli, sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi empat daerah fungsi utama yakni pembangkit, transmisi, distribusi, dan layanan eceran.

a. Pembangkit

Pembangkit merupakan konversi tenaga listrik dari bentuk energi lainnya seperti kimia (gas, batu bara, hidrogen), nuklir, matahari energi hidro, energi panas bumi, energi angin dan getaran.

b. *Transmisi*

Transmisi artinya transfer energi listrik dalam jumlah besar dari satu tempat ke tempat lainnya melalui beberapa jaringan transmisi. Transmisi ini menghubungkan generator dan jaringan distribusi.

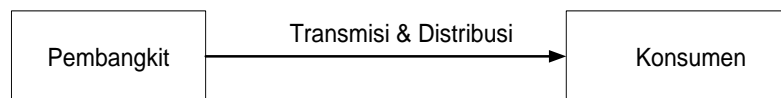
c. *Distribusi*

Distribusi merupakan proses pengiriman tenaga listrik dari jaringan lokal ke konsumen.

d. *Retail Service*

Retail service (Jasa eceran) secara luas artinya dapat menghubungkan jasa konsumen eceran, yang mana fungsi utamanya adalah mengukur dan menagih konsumen untuk pengiriman daya.

Dalam sistem monopoli, empat blok fungsi di atas dikendalikan oleh satu kesatuan tunggal. Hingga hari ini jaringan sistem tenaga sangat besar dalam volume produksi dan area geografis. Operasi ini menjadi fenomena kompleks yang tidak hanya bergantung pada *state* teknologi, tetapi juga isu kompleks seperti ekonomi, social, dampak lingkungan, dan keputusan politik. Dalam monopoli tradisional, satu perusahaan memiliki izin untuk menghasilkan, mentransmisikan dan mendistribusikan daya listrik kepada konsumen dalam satu yurisdiksi. Di beberapa hal, distribusi dibagi antar dua atau lebih utilitas listrik seperti badan kota atau perusahaan, serta distribusi pribadi. Harga listrik ditetapkan oleh utilitas yang dijustifikasi oleh biaya pembangkit transmisi dan distribusi. Skema diagram industri tenaga dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 5.2. Diagram Skema Industri Tenaga Listrik Tradisional

Industri tenaga tradisional dikategorikan berdasarkan fungsi yang mereka laksanakan. Banyak utilitas melaksanakan keseluruhan empat fungsi industri tenaga, meskipun sebagian lainnya hanya melaksanakan

satu atau dua. Hal ini bergantung pada fungsi yang mereka laksanakan, yang mana dapat dikategorikan sebagai berikut.

- a) **Utilitas Listrik Terintegrasi secara Vertikal**
Utilitas ini memiliki fasilitas dan mampu mengelola semua fungsi pembangkitan, transmisi, pengiriman dan penjualan tenaga listrik. Integrasi secara vertikal merepresentasikan, bahwa seluruh fungsi yang diperlukan terjalin dalam satu sistem dan perusahaan. Hampir seluruh utilitas listrik sebelum tahun 1990 termasuk dalam kategori ini. Mereka diberikan hak monopoli oleh pemerintah atau negara, juga hak eksklusif untuk memproduksi dan menjual tenaga listrik. Sebagai balasannya mereka wajib menyediakan tenaga listrik untuk semua konsumen.
- b) **Utilitas Generation and Transmission (G&T)**
Utilitas ini memproduksi listrik dan memindahkan energi dalam jumlah besar ke lokasi yang berbeda-beda. Mereka juga menjual dalam jumlah besar kepada utilitas lainnya.
- c) **Perusahaan Distribusi Lokal (*Local Distribution Companies*)**
Utilitas listrik lokal yang hanya memiliki dan mengoperasikan sistem distribusi. Mereka juga menyediakan jasa dan penjualan eceran.
- d) ***Independent Power Producer (IPP) and Non-Utility Generators (NUG)***
Produser tenaga independen merupakan perusahaan yang mempunyai dan mengoperasikan pembangkit di luar kendali utilitas industri tenaga listrik tradisional. IPP menjual tenaga listrik ke utilitas lain. *Non-utility generator* merupakan pabrik yang memiliki atau menggunakan sendiri generator dalam rangka memproduksi tenaga yang bisa mereka gunakan sendiri, serta menjual kelebihan energi ke utilitas.

Deregulasi Sistem Tenaga Listrik

Pada mulanya sistem tenaga listrik dikembangkan dalam konsep monopoli alami. Monopoli ini terjadi jika biaya produksi berkurang

sebagai *output* pertumbuhan yang besar. Sebelum tahun 1990, seluruh sistem tenaga di dunia dijalankan dengan terintegrasi vertikal di dalam sistem monopoli. Setelah itu disadari, bahwa industri tenaga listrik memerlukan monopoli. Hal ini terbukti, bahwa akses terbuka dan kompetisi bisnis menurunkan harga satuan. Hal yang sama dipercaya bisa terjadi dalam industri tenaga listrik. Oleh sebab itulah membawa kompetisi dalam sektor tenaga listrik pada level pembangkitan dan konsumen eceran merupakan hal yang penting. Proses regulasi dan kekurangan tentang kompetisi tidak memberikan utilitas listrik perangsang untuk meningkatkan performansi atau mengambil risiko terhadap ide baru yang mungkin meningkatkan nilai konsumen. Alasan utama yang mendorong deregulasi ialah, bahwa pasar bebas mempromosikan efisiensi. Apabila suatu utilitas investasi dalam suatu proyek yang tidak ekonomis, maka masih akan menambah biaya investasi untuk listrik. Kompetisi akan mendorong penggunaan teknologi baru untuk pembangkit listrik dengan efisiensi lebih baik, sementara pembangkit yang tidak efisien akan mati.

Beberapa Negara yang pertama kali melaksanakan deregulasi utilitas listrik ialah Argentina dan Inggris, di mana pemerintah memprivatisasi industri. Dalam deregulasi, pemerintah memprivatisasi sektor industri sehingga memperoleh keuntungan dalam jumlah besar. Sudah terbukti dari banyak kasus, bahwa suatu organisasi pribadi dapat melayani lebih baik dari pada organisasi pemerintah. Kompetisi juga meningkatkan perhatian pada pelanggan. Alasan lainnya dari deregulasi ialah untuk memberikan konsumen suatu pilihan untuk memilih penyalur (*supplier*) mereka. Walaupun bentuk “konsumen” terbatas hanya untuk jumlah yang besar atau pembeli eceran.

Deregulasi dan restrukturisasi industri tenaga listrik mendatang menjadi bagian yang paling besar dunia. Beberapa negara mampu dengan cepat melangkah maju menuju deregulasi penuh, sementara yang lainnya masih restrukturisasi industri tenaga untuk mengizinkan beberapa tipe deregulasi. Walaupun pertimbangan untuk perubahan tidak selalu sama, dampak yang diharapkan umumnya sama.

Struktur Deregulasi Tenaga Listrik

Berlawanan dengan sistem tenaga tradisional yang terintegrasi secara vertikal, secara penuh monopoli diubah dari sektor pembangkit dan distribusi (termasuk layanan eceran) ke dalam deregulasi sistem tenaga. Hasilnya, pembangkit dan distribusi kompetitif dengan banyak perusahaan yang berbeda berkompetisi dalam rana bisnis. Di samping itu, banyak regulator pemerintah menyadari bahwa yang terbaik hanya memiliki satu sistem transmisi sehingga dalam banyak kasus sektor transmisi tetap regulasi. Ciri-ciri dasar deregulasi sistem tenaga listrik dapat dilihat sebagai berikut.

a) *Independent System Operator (ISO)*

Sistem operator independen memiliki peran sebagai supervisor untuk operasi sistem, perencanaan, dan keamanan sistem. ISO memiliki otoritas pengaturan operasi seluruh sistem tenaga dan secara normal mengoperasikan dan memelihara jaringan transmisi. ISO melaksanakan fungsi-fungsinya sebagai berikut.

1. Menyediakan akses dan perbandingan terbuka dengan cara yang sama seperti posisi konsumen pada fasilitas transmisi.
2. Secara eksklusif ISO mengatur jaringan dalam suatu cara yang dapat dipercaya dan efisien.
3. Mengadopsi, melindungi, dan memonitor pelaksanaan melalui pemeriksaan, pemeliharaan, perbaikan, dan penggantian standar untuk *ISO Controlled Grid*, menyediakan kualitas tinggi, serta menyediakan layanan listrik yang aman, dan terpercaya, termasuk selama periode darurat dan bencana.
4. Menyediakan atau memperoleh layanan tambahan (*ancillary service*) untuk *ISO Controlled Grid* dan untuk mengirimkan layanan yang diperlukan.
5. Layanan penjadwalan transmisi untuk semua transmisi dalam *ISO Controlled Grid*.
6. Mengirimkan kembali sumber daya yang tersedia untuk membebaskan kemacetan atau kebuntuan transmisi.

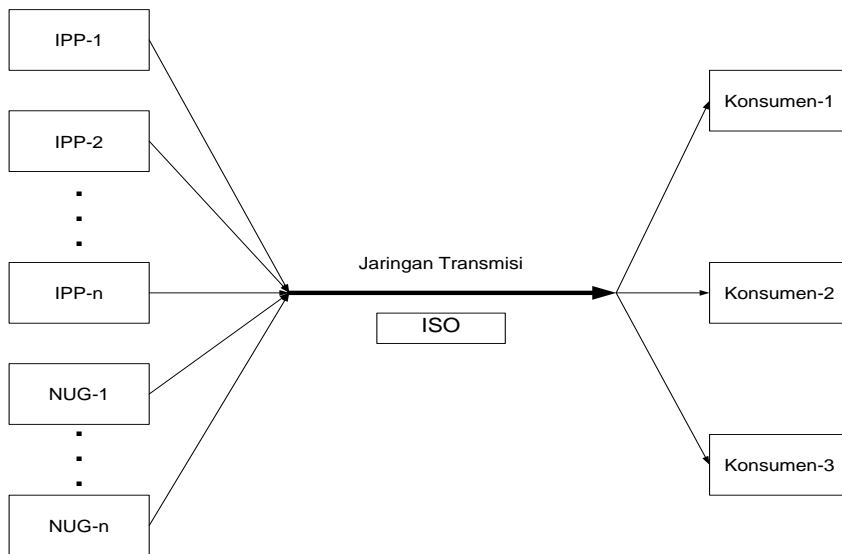
7. Mengembangkan dan menyampaikan metodologi layanan transmisi, serta menilai layanan transmisi dan layanan tambahan sekaligus memulihkan kembali biaya-biaya administrasi.
8. Menetapkan aturan dan protokol operasi untuk operasi yang dapat dipercaya sekaligus partisipasi dalam pasar layanan tambahan.
9. Memelihara keandalan operasi *ISO Controlled Grid*
10. Menyediakan informasi harga pasar terbuka untuk layanan transmisi dan pasar layanan tambahan.
11. Menjamin sumber daya pembangkit dan transmisi yang dibutuhkan untuk kriteria prestasi perencanaan dan operasi cadangan.
12. Melakukan promosi pengembangan dan masuk ke persetujuan untuk pembelian dan penjualan daya yang meliputi kontrak bilateral.
13. Mengalokasikan dan mengatur rugi-rugi transmisi untuk bagian yang berpartisipasi.
14. Melacak seluruh transaksi serta menghitung transmisi yang digunakan untuk setiap pembangkit dan IPP.
15. Bekerja sebagai pasar tertentu untuk pembelian dan penjualan tenaga listrik (jika tidak ada '*power exchange*')

b) *Power Exchange*

Power exchange merupakan organisasi seperti bursa yang mengizinkan pembeli dan penjual listrik untuk membeli dan menjual tenaga listrik sebagai suatu komoditas.

c) *Competitive Power Generations*

Merupakan sektor pembangkit dalam akses terbuka, sebagai suatu kesatuan yang berkualitas, berkompeten, mampu memenuhi standar dan mendapat izin, serta mampu memproduksi dan menjual tenaga listrik. Umumnya banyak produsen tenaga independen (*independent power producers* = IPP) dan *non-utility generator* (NUG) yang bersaing satu sama lain dalam hal produksi dan penjualan tenaga listrik pada pasar tenaga listrik.



Gambar 5.3. Diagram Skema Deregulasi Jaringan Tenaga Listrik dengan ISO

d) Competitive Distributor

Kompetisi distribusi dalam hal ini ialah membeli listrik dalam jumlah besar pada level perdagangan yang besar, serta menjual ke konsumen. Mereka menawarkan untuk membeli *power exchange* atau ISO (jika *power exchange* tidak ada pada sistem tersebut) sama dengan cara penawaran ke IPPS dan NUG dalam rangka penjualan daya listrik. Mereka membebani individu untuk energi yang mereka gunakan pada tarif yang sudah ditetapkan pemerintah. Distributor dapat memilih penyalur mereka. Distributor atau konsumen tenaga listrik skala besar boleh membeli daya dari pembangkit melalui kontrak bilateral.

e) Bilateral Contracts

Banyak konsumen dengan daya besar masuk ke kontrak bilateral melalui para penyalur atau produsen tenaga listrik demi menghindari fluktuasi harga energi di pasaran di dalam era deregulasi. Penjual mengatur transportasi dari kontrak tenaga listrik di atas hingga sepertiga

bagian jaringan transmisi. Ini merupakan kontrak individu yang mana tidak akan mempengaruhi kontrak lain. Konsep kontrak bilateral mengizinkan pembangkit dan konsumen untuk bekerja menurut kebijakan mereka agar tidak bergantung pada penawaran sehari-hari seperti yang ada di dalam sistem bursa daya listrik. Detail harga dan layanan lainnya untuk kontrak tertentu ditentukan oleh mereka yang terlibat dalam kontrak tersebut. Hal ini yang akan memberikan mereka lebih banyak kebebasan dan fleksibilitas untuk memilih. Kontrak bilateral memungkinkan konsumen membuat harga terbaik untuk suplai tenaga listrik dengan siapa pun di dalam pasar kompetitif untuk memenuhi kebutuhan mereka. Mengizinkan produsen kuasa dalam hal ini ialah mengontrak secara langsung dengan konsumen, pemasaran, atau menciptakan kompetisi pengecer pada kedua transaksi. Para pembangkit bersaing untuk menyuplai permintaan ini. Konsumen dan wakil mereka di sini memiliki kebebasan penuh untuk memilih penyalur. Para penyalur boleh menuntut harga pasar dan bersaing untuk harga, jangka waktu kontrak, pilihan pembayaran, jenis pembangkit, dan kualitas layanan listrik. Kontrak bilateral menyediakan banyak pilihan untuk memenuhi berbagai kebutuhan konsumen. Banyak utilitas listrik yang masih belum di deregulasi. Memberikan izin kontrak bilateral merupakan langkah pertama ke arah deregulasi. Konsumen dalam kontrak bilateral juga mempunyai aneka pilihan berbagai jenis penyalur. Konsumen besar dapat bertransaksi secara langsung menggunakan suatu produsen tenaga listrik atau membeli energi melalui pasar, makelar energi, atau perusahaan jasa energi. Konsumen yang lebih kecil bisa membentuk perkumpulan atau asosiasi beban, serta dapat membeli energi dengan cara serupa.

f) *Power Pool*

Suatu deregulasi bursa daya listrik dianggap sebagai format pasar yang umum saat ini berkaitan dengan struktur yang sederhana. Utilitas pembangkit atau IPP dan konsumen melakukan penawaran untuk menjual dan membeli daya listrik dalam bursa daya listrik. Dalam suatu sistem bursa, *utility* pembangkit tidak memiliki target apapun untuk

konsumen yang spesifik dibandingkan mereka yang menawarkan untuk memperoleh akses pada jaringan. Suatu pembangkit akan ke luar dari pasar yang kompetitif apabila harganya terlalu tinggi. Menggunakan cara yang sama, suatu konsumen tidak akan memperoleh tenaga listrik apabila penawarannya terlalu rendah. Bursa daya listrik memastikan harga tunggal untuk tiap jam yang ditentukan berdasarkan hubungan suplai-permintaan yang ekonomis. Semua bagian yang dilibatkan di dalam pasar memiliki hak yang sama untuk mengakses informasi tentang harga dan permintaan. Suatu sistem bursa daya listrik tetap eksis menggunakan prosedur pengiriman ekonomis (*economic dispatch*).

g) Market Clearing Price

Suatu sistem operator independen memiliki tanggung jawab terhadap pemeliharaan keseimbangan antara suplai dan permintaan daya. Suatu sistem tenaga listrik yang ideal harus memiliki daya yang cukup sehingga kebutuhan konsumen dapat terpenuhi. *Market clearing price* merupakan harga terhadap penyalur dan penjual menyepakati penjualan dan pembelian daya. Operator sistem menentukan *market clearing price* dari suplai dan permintaan sehingga semua kebutuhan daya akan tercukupi. Perusahaan dengan penawaran lebih tinggi dibandingkan *market clearing price* tidak akan mampu menjual daya. Semua perusahaan yang menawarkan lebih rendah dari *market clearing price* akan dipertimbangkan sebagai penawaran yang sukses dan menyuplai permintaan. Semua penawaran yang sukses akan dibayar *market clearing price* tanpa bergantung dengan harga penawaran mereka.

Kompetisi di kalangan penyalur merupakan inti dari deregulasi. Apabila suatu penyalur menawarkan lebih tinggi dari *market clearing price*, maka energinya tidak akan dimasukkan ke dalam jadwal pengiriman beban (*load dispatch*). Fakta inilah yang memaksa penyalur akan keluar dari bisnis. Kekhawatiran ini mendorong penyalur untuk menawarkan harga paling kompetitif agar tetap bisa eksis di pasar energi listrik [21]-[28], [30]-[33],[38].

Prosedur dan Analisis

Bagian ini melibatkan penuh literatur yang relevan sebagai referensi utama. Terutama jurnal-jurnal dari *IEEE Transaction on Power Systems* dan *ELSEVIER (Electrical Power and Energy System)*, sedangkan buku teks yang digunakan adalah analisis *power system*.

Studi Aliran Daya

Studi aliran daya (*Power Flow*) disebut juga *load flow* yang merupakan bagian penting dalam analisis sistem tenaga. Untuk menyelesaikan masalah aliran daya, sistem diasumsikan dalam operasi seimbang dan menggunakan model satu fasa. Jaringan terdiri atas beberapa simpul/bus dan cabang dengan impedansi yang dinyatakan dalam per-unit (pu) pada base MVA. Studi aliran daya digunakan untuk menganalisis suatu sistem aliran daya listrik yang berasal dari pusat-pusat pembangkit yang disalurkan melalui saluran transmisi hingga ke pusat-pusat beban. Tentu saja dalam prosesnya tetap memperhatikan kapasitas daya yang disalurkan dan rugi-rugi daya.

Dalam studi aliran daya, terdapat dua hal yang perlu dilakukan di dalam perhitungannya, yakni:

1. Tegangan pada tiap-tiap bus
2. Aliran daya aktif dan daya reaktif pada masing-masing saluran, yang dapat dihitung dengan persamaan aliran daya sebagai berikut.

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (3.1)$$

$$= V_i \left[\frac{V_i - V_j}{Z_{ij}} \right]^* \quad Z_{ij} \text{ adalah impedansi saluran}$$

Agar aliran daya dalam suatu sistem dapat dianalisis, perlu bagi kita menentukan matriks admitansi bus. Suatu sistem dengan jumlah bus n , sehingga hubungan arus, tegangan, dan admitansi dinyatakan dalam persamaan matriks berikut.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

atau

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (3.3)$$

notasi:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i \quad (3.4)$$

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$$

Untuk mempermudah melakukan perhitungan aliran daya, kita perlu memperhatikan jenis-jenis bus yang terdapat dalam jaringan, yang mana dibagi menjadi tiga klasifikasi sebagai berikut.

1. *Load bus* (PQ Bus)
 - a. Terhubung dengan beban
 - b. P dan Q diketahui dan nilainya tetap
 - b. $|V|$ dan δ dihitung
2. *Generator Bus* (PV Bus)
 - a. Terhubung dengan generator
 - b. P dan $|V|$ beban diketahui dan nilainya tetap
 - c. $|Q|$ dan δ generator dihitung
3. *Swing/Slack Bus*
 - a. Terhubung dengan generator
 - b. $|V|$ dan δ beban diketahui dan nilainya tetap
 - c. P dan Q dihitung
 - d. Mencatu rugi daya dan beban yang tidak dapat dicatu oleh generator yang lain

Beberapa metode untuk menyelesaikan aliran daya antara lain metode Gauss-Seidel, Newton-Raphson, *Decouple*, dan metode *Fast-Decouple*.

Persamaan Umum Aliran daya adalah sebagai berikut.

$$P_i - jQ_i = (V_i^*) \sum_{j=1}^n (Y_{ij} V_j) \quad (3.5)$$

Metode Newton-Raphson agak lebih mudah bila dibandingkan dengan metode Gauss-Seidel. Hal ini karena jumlah iterasi yang dibutuhkan bergantung pada ukuran sistem di mana evaluasi fungsi dibutuhkan oleh masing-masing iterasi. Mengingat daya aktif dan besar tegangan pada aliran daya yang digunakan adalah untuk bus *voltage-controlled*, maka persamaan aliran daya dapat dirumuskan dalam bentuk polar.

Persamaan arus yang masuk ke bus *i* tersebut dapat ditulis dalam bentuk matriks admitansi sebagai berikut.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (3.6)$$

Jika besaran *j* dimasukkan ke bus *i*, dalam bentuk polar, maka persamaan yang dapat ditulis adalah sebagai berikut.

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.7)$$

Daya dalam bentuk kompleks pada bus *i* adalah:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (3.8)$$

Dengan menyubstitusi Persamaan (3.7) untuk I_i pada Persamaan (3.8) diperoleh:

$$P_i - jQ_i = |V_i| \angle -\delta_i \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (3.9)$$

Maka daya aktif dan daya reaktif (imajiner) secara terpisah diperoleh:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.10)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.11)$$

Persamaan (3.10) dan (3.11) merupakan persamaan aljabar nonlinear dalam hubungan variabel independen, yang mana besarnya tegangan dalam satuan per unit dan sudut fasa dalam radian. Pengembangan kedua persamaan tersebut dalam deret Taylor menghasilkan persamaan linear. Dengan mengasumsikan bus 1 sebagai *slack* bus, maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \vdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \vdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \vdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \vdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \dots \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Dalam matriks Jacobian, kita melihat terjadinya perbandingan linear antara perubahan terkecil sudut tegangan ($\Delta \delta_i^{(k)}$) dan besarnya tegangan ($\Delta |V_i^{(k)}|$) dengan perubahan daya aktif dan reaktif $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$.

Persamaan (3.12) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Elemen diagonal dan *off* diagonal J_1 adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (3.15)$$

Elemen diagonal dan *off* diagonal J_2 adalah:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta + \delta_{ji}) \quad (3.16)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (3.17)$$

Elemen diagonal dan *off* diagonal J_3 adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (3.19)$$

Elemen diagonal dan *off* diagonal J_4 adalah

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta + \delta_{ji}) \quad (3.20)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq i \quad (3.21)$$

Perbedaan antara daya yang ditetapkan dan daya hasil perhitungan merupakan daya residual dan diberikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (3.22)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (3.23)$$

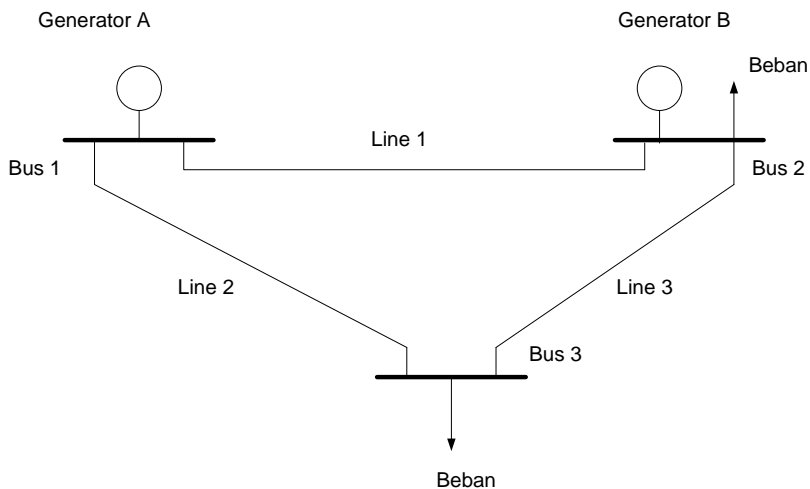
Perhitungan baru untuk tegangan bus adalah.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (3.24)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (3.25)$$

Contoh Analisis Aliran Daya

Suatu jaringan sistem 3 bus kecil pada gambar di bawah ini menjelaskan teknik aliran daya Newton Raphson. Generator ada pada Bus 1 dan 2, kemudian beban ada pada Bus 2 dan 3. Bus 1, 2 dan 3 didefinisikan sebagai bus *slack*, bus generator dan bus beban, secara berturut-turut.



Gambar 5.4 Jaringan Sistem 3 Bus

Data parameter jaringan dan data generator ditunjukkan dua tabel berturut-turut di bawah ini. Daya aktif dan reaktif pada Bus 2 adalah 120 MW dan 50 MVAR dan pada bus 3 adalah 250 MW dan 80 MVAR. Nilai base yang digunakan untuk analisis aliran daya ini ialah 100 MVA dan 138 kV.

Tabel 5.1 Parameter Jaringan Sistem 3 Bus

No.	Dari Bus	Ke Bus	Resistansi (pu)	Reaktansi (pu)
1	1	2	0.0200	0.0400
2	1	3	0.0100	0.0300
3	2	3	0.0125	0.0250

Tabel 5.2 Data Generator Sistem 3 Bus

Unit Generator	Output Maksimum (MW)	Output Minimum (MW)
Generator A	450	90
Generator B	250	30

Sebelum menganalisis aliran daya, magnitudo tegangan dan sudut fasa bus *slack* dan magnitudo tegangan bus generator harus ditentukan. Misalnya magnitudo tegangan Bus 1 adalah 1.05 pu, Bus 2 adalah 1.04 pu, sementara untuk sudut fasa Bus 1 (*slack*) adalah 0. Untuk mengecek konvergensi iterasi, maka nilai toleransi yang digunakan ialah 0.0001.

Dari parameter jaringan, diperoleh nilai admitansi $y_{12} = 10 - j20$, $y_{13} = 10 - j30$, dan $y_{23} = 16 - j32$ sehingga bentuk matriks admitansi bus yang dapat digambarkan ialah sebagai berikut.

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 20 - j50 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{bmatrix}$$

Perubahan matriks admitansi bus ke bentuk polar dengan sudut dalam radian

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 53,85165 \angle -1,9029 & 22,36068 \angle 2,0344 & 31,62278 \angle 1,8925 \\ 22,36068 \angle 2,0344 & 58,13777 \angle -1,1071 & 35,77709 \angle 2,0344 \\ 31,62278 \angle 1,8925 & 35,77709 \angle 2,0344 & 67,23095 \angle -1,1737 \end{bmatrix}$$

Dari Persamaan 3.10 dan 3.11, ekspresi untuk daya reaktif pada Bus 2 dan 3 dan daya reaktif pada bus 2 adalah:

$$\begin{aligned}
P_2 &= |V_2||V_2||Y_{21}|\cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2|Y_{22}|\cos(\theta_{22}) + |V_2||V_3||Y_{23}|\cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\
P_3 &= |V_3||V_1||Y_{31}|\cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3||V_2||Y_{32}|\cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) + |V_3|^2|Y_{33}|\cos(\theta_{33}) \\
Q_2 &= -|V_2||V_1||Y_{21}|\sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2|Y_{22}|\sin(\theta_{22}) - |V_2||V_3||Y_{23}|\sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)
\end{aligned}$$

Daya beban dan daya real yang dibangkitkan dinyatakan dalam per unit

$$\begin{aligned}
S_2^{sch} &= -\frac{(400 + j250)}{100} = -4,0 - j2,5 \text{ pu} \\
P_3^{sch} &= \frac{200}{100} = 2,0 \text{ pu}
\end{aligned}$$

Tegangan bus *slack* $V_1 = 1,05 \angle 0 \text{ pu}$ dan besar tegangan bus 3 adalah $|V_3| = 1,04 \text{ pu}$. *Starting* dengan perhitungan awal $|V_2^{(0)}| = 1,0$, $\delta_2^{(0)} = 0,0$, dan $\delta_3^{(0)} = 0,0$ Daya sisa dihitung dari persamaan (3.22) dan (3.23).

$$\begin{aligned}
\Delta P_2^{(0)} &= P_2^{sch} - P_2^{(0)} = -4,0 - (-1,14) = -2,8600 \\
\Delta P_3^{(0)} &= P_3^{sch} - P_3^{(0)} = 2,0 - (0,5616) = 1,4384 \\
\Delta Q_2^{(0)} &= Q_2^{sch} - Q_2^{(0)} = -2,5 - (-2,28) = -0,2200
\end{aligned}$$

Evaluasi elemen matriks Jacobian dengan perhitungan awal, set persamaan linear pada iterasi pertama menjadi

$$\begin{bmatrix} -2,8600 \\ 1,4384 \\ -0,2200 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 54,2800 & -33,2800 & 24,86000 \\ -33,2800 & 66,04000 & -16,64000 \\ -27,1400 & 16,64000 & 49,72000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \\ \Delta |V_2^{(0)}| \end{bmatrix}$$

diperoleh penyelesaian persamaan matriks di atas, tegangan bus baru dalam iterasi pertama yaitu

$$\begin{aligned}
\Delta \delta_2^{(0)} &= -0,045263 & \delta_2^{(1)} &= 0 + (-0,045263) = -0,045263 \\
\Delta \delta_3^{(0)} &= -0,007718 & \delta_3^{(1)} &= 0 + (-0,007718) = -0,007718 \\
\Delta |V_2^{(0)}| &= -0,026548 & |V_2^1| &= 1 + (-0,026548) = 0,97345
\end{aligned}$$

sudut fasa tegangan dalam radian. Untuk iterasi kedua diperoleh

$$\begin{bmatrix} -0,099218 \\ 0,021715 \\ -0,050914 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 51,724675 & -31,765618 & 21,302567 \\ -32,981642 & 65,656383 & -15,379086 \\ -28,538577 & 17,402838 & 48,103589 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(1)} \\ \Delta\delta_3^{(1)} \\ \Delta|V_2^{(1)}| \end{bmatrix}$$

dan

$$\begin{aligned} \Delta\delta_2^{(1)} &= -0,001795 & \delta_2^{(2)} &= -0,045263 + (-0,001795) = -0,04706 \\ \Delta\delta_3^{(1)} &= -0,000985 & \delta_3^{(2)} &= -0,007718 + (-0,000985) = -0,00870 \\ \Delta|V_2^{(1)}| &= -0,001767 & |V_2^{(2)}| &= 0,973451 + (-0,001767) = 0,971684 \end{aligned}$$

Untuk iterasi ketiga diperoleh

$$\begin{bmatrix} -0,000216 \\ 0,000038 \\ -0,000143 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 51,596701 & -31,693866 & 21,147447 \\ -32,933865 & 65,597585 & -15,351628 \\ -28,548205 & 17,396932 & 47,954870 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(2)} \\ \Delta\delta_3^{(2)} \\ \Delta|V_2^{(2)}| \end{bmatrix}$$

dan

$$\begin{aligned} \Delta\delta_2^{(2)} &= -0,000038 & \delta_2^{(3)} &= -0,047058 + (-0,000038) = -0,047096 \\ \Delta\delta_3^{(2)} &= -0,0000024 & \delta_3^{(3)} &= -0,008703 + (-0,0000024) = -0,008705 \\ \Delta|V_2^{(2)}| &= -0,0000044 & |V_2^{(3)}| &= 0,971684 + (-0,0000044) = 0,9716796 \end{aligned}$$

Penyelesaian pada iterasi ke 3 dengan daya maksimum tidak sebanding $2,5 \times 10^{-2}$ dengan $V_2 = 0,97168 \angle -2,696^\circ$ dan $V_3 = 1,04 \angle -0,4988^\circ$. Dari Persamaan (3.10) dan (3.11), besar daya reaktif bus 3, daya aktif, dan daya reaktif pada *slack* bus adalah sebagai berikut.

$$Q_3 = 1,4617 \text{ pu}$$

$$P_1 = 2,1842 \text{ pu}$$

$$Q_1 = 1,4085 \text{ pu}$$

Kalkulasi Rugi-Rugi Transmisi dari Analisis Aliran Daya

Rugi-rugi transmisi dapat dikalkulasi berdasarkan penyelesaian aliran daya. Hasil dari analisis aliran daya memberikan magnitudo tegangan dan sudut fasa untuk semua bus. Dari nilai ini, arus yang melalui semua jaringan dapat dihitung. Misalnya arus dari Bus i ke Bus j dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$I_{ij} = Y_{ij}(V_i - V_j) \quad (3.26)$$

Y_{ij} adalah admitansi jaringan transmisi antara Bus i dan Bus j

Dari nilai-nilai yang diketahui terhadap tegangan bus dan injeksi arus masing-masing jaringan, maka injeksi daya dapat dihitung. Rugi-rugi jaringan merupakan jumlah injeksi daya dalam jaringan dari kedua sisi. Injeksi daya dalam jaringan dalam hal ini bisa ditentukan dari persamaan sebagai berikut.

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (3.27)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (3.28)$$

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (3.29)$$

S_{ij} = injeksi daya dari bus i ke jaringan antara Bus i dan Bus j

S_{ji} = injeksi daya dari bus j ke jaringan antara Bus i dan Bus j

S_{Lij} = rugi daya dalam jaringan antara Bus i dan Bus j

I_{ij}^* = *conjugate* arus kompleks I_{ij}

Pada akhirnya rugi-rugi daya untuk semua jaringan dapat dihitung. Total rugi-rugi transmisi merupakan penjumlahan keseluruhan rugi-rugi pada seluruh jaringan. Dengan Persamaan (3.26), arus pada seluruh jaringan dapat diperoleh. Begitu pula dengan Persamaan (3.27) - (3.29), rugi-rugi jaringan dapat dihitung. Tabel di bawah ini menunjukkan rugi-rugi jaringan dari sistem 3 bus yang ditunjukkan pada gambar sebelumnya.

Tabel 5.3 Aliran Daya dan Rugi-Rugi Jaringan Sistem 3 Bus

Line	From Bus	To Bus	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)	Rugi-rugi Jaringan	
					Aktif (MW)	Reaktif (MVAR)
1	1	2	91.023	-17.439	1.559	3.116
	2	1	-89.464	20.555		
2	1	3	184.617	45.307	3.278	9.832
	3	1	-181.339	-35.475		
3	2	3	69.464	46.133	0.803	1.607
	3	2	-68.661	-44.525		
Total rugi-rugi transmisi					5.640	14.555

Rugi-rugi transmisi yang dihitung dari analisis aliran daya dinilai lebih akurat dibandingkan dengan metode lain. Utilitas listrik sudah menghitung rugi-rugi transmisi dengan analisis aliran daya lebih dari seratus tahun yang lalu. Sebelum deregulasi di sektor listrik, analisis aliran daya sudah cukup untuk mengestimasi rugi-rugi transmisi. Setelah deregulasi dimulai, hal ini menjadi kebutuhan untuk menghitung rugi-rugi transmisi. Kondisi ini berkaitan dengan transaksi daya individu yaitu dari suatu generator *particular* dan suatu beban *particular*. Analisis aliran daya tersebut nantinya tidak dapat digunakan untuk menghitung rugi-rugi dari tipe tersebut.

Metode Alokasi Z-Bus

Tujuan metode alokasi rugi-rugi Z-Bus seperti halnya pendekatan-pendekatan lainnya ialah untuk mengambil aliran daya yang telah terpecahkan. Termasuk agar secara sistematis mampu mendistribusikan rugi-rugi transmisi sistem, P_{loss} di antara n bus jaringan berdasarkan persamaan sebagai berikut.

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^n L_k \quad (3.30)$$

Komponen rugi L_k pada persamaan (3.30) merupakan bagian dari rugi-rugi sistem yang dialokasikan pada injeksi daya nyata pada bus k .

Karena itulah langkah ini ditujukan pada masing-masing bus k , sebagai tanggung jawab pembelian untuk L_k pada batas harga pasar λ . Biaya tambahan untuk alokasi rugi-rugi seharusnya disubsidi berdasarkan pendapatan pembangkit dan ditambahkan pada pembayaran beban. Dengan begitu, pendapatan *pool* memiliki nilai anggaran yang netral. Umumnya, jika sebuah bus k memiliki sisi pembangkit (P_{gk}) dan kebutuhan beban (P_{dk}), alokasi komponen rugi-rugi L_k dapat dipisahkan menjadi dua menggunakan metode pro rata. Contoh, jika $\gamma_k = (P_{gk} / (P_{gk} - P_{dk}))$, pendapatan pembangkit k yang diraih dari *Pool* dikurangi rugi-rugi sebesar $\lambda(\gamma_k L_k)$, sedangkan beban k membayar ke *Pool* ditambah rugi-rugi sejumlah $\lambda((1-\gamma_k)L_k)$.

Untuk menghitung L_k berdasarkan metode alokasi *Z-bus Loss Allocation*, yang perlu dipertimbangkan ialah matriks admitansi jaringan $Y = G + jB$, tipikal besar, terpisah dan tidak singular. Seandainya penyelesaian aliran daya ada, maka ia menjelaskan kuantitas yang lain. Vektor injeksi arus bus kompleks (I) dan vektor tegangan bus kompleks (V). Rugi sistem riil dapat diekspresikan lain dalam Y dan V atau melalui Z dan I , di mana $Z = Y^{-1} = R + jX$ pada Z -bus atau matriks impedansi. Langkah awal ialah dari persamaan:

$$P_{loss} = \Re \left\{ \sum_{k=1}^n V_k I_k^* \right\} \quad (3.31)$$

Rugi sistem dapat diekspresikan lain melalui Y sebagai:

$$P_{loss} = \Re \left\{ \sum_{k=1}^n V_k \left(\sum_{j=1}^n Y_{kj}^* V_j^* \right) \right\} \quad (3.32)$$

atau melalui Z sebagai:

$$P_{loss} = \Re \left\{ \sum_{k=1}^n I_k^* \left(\sum_{j=1}^n Z_{kj} I_j \right) \right\} \quad (3.33)$$

Hal ini menghasilkan formulasi 2 matriks Z, yang mana salah satunya menghasilkan jumlah penentuan rugi-rugi yang layak. Namun pada kenyataannya, rugi secara langsung dikaitkan dengan arus, sebagai variabel independen pada Persamaan (3.33).

Gagasan dasar dari pendekatan Z-bus adalah pada pemisahan *formula loss* (3.33) kedua tambahan utama, satu matriks resistansi R, dan yang lainnya matriks reaktansi X. Maka,

$$P_{loss} = \Re \left\{ \sum_{k=1}^n I_k^* \left(\sum_{j=1}^n R_{kj} I_j \right) \right\} + \Re \left\{ \sum_{k=1}^n I_k^* \left(\sum_{j=1}^n jX_{kj} I_j \right) \right\} \quad (3.34)$$

Karena matriks X adalah simetris, bentuk kedua dari Persamaan (3.34) menjadi nol, sehingga

$$P_{loss} = \Re \left\{ \sum_{k=1}^n I_k^* \left(\sum_{j=1}^n R_{kj} I_j \right) \right\} \quad (3.35)$$

Pemisahan alami pada rugi-rugi sistem untuk bus jaringan kini sudah ada dengan sendirinya. Untuk menyelesaikan bentuk matriks, vektor injeksi daya nyata ditunjukkan seperti:

$$P = \Re \{ \text{diag} (I^*) RI \} + \Re \{ j \text{diag} (I^*) XI \} \quad (3.36)$$

Selanjutnya injeksi daya nyata tersebut terpisahkan dalam dua komponen utama, yaitu komponen rugi-rugi L, yang berisikan L:

$$P = \Re \{ \text{diag} (I^*) RI \} \quad (3.37)$$

Untuk menentukan vektor komponen-komponen kerugian L, langkah pertama yang dilakukan ialah memecahkan dua rangkaian persamaan aljabar $Y^{-1}(\Re\{I\})$ dan $Y^{-1}(\Im\{I\})$. Bentuk RI dalam Persamaan (3.37) dapat diperoleh dengan menggabungkan dua solusi ini sebagai berikut.

$$RI = \Re \{ Y^{-1}(\Re\{I\}) \} + \Re \{ Y^{-1}(\Im\{I\}) \} \quad (3.38)$$

Alokasi rugi-rugi daya jaringan transmisi pada masing-masing bus dapat dilakukan dengan Persamaan (3.39) dan (3.40) sebagai berikut.

$$P_L = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N \sum_{j \in H_i} \left\{ \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \right\} \quad (3.39)$$

$$Q_L = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N \sum_{j \in H_i} \left\{ \frac{X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\theta_i - \theta_j)] \right\} \quad (3.40)$$

P_L dan Q_L merupakan representasi total rugi-rugi jaringan dalam suatu sistem bus N . H_i adalah set bus yang terhubung secara langsung dengan bus $i = 1, \dots, N$, kemudian $R_{ij} + jX_{ij}$ adalah nilai impedansi jaringan antara bus i dan bus j , dan V_i , sedangkan θ_i adalah besarnya tegangan dan sudut fasa bus i .

Persamaan 3.40 hanya dapat menghitung alokasi rugi-rugi daya reaktif pada setiap bus apabila sistem ini mengabaikan *line charging*. Artinya, untuk alokasi daya reaktif pada sistem yang memperhitungkan *line charging*, persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S_{ij}^* &= P_{ij} - jQ_{ij} = V_i^* I_{ij} \\ &= V_i^* [(V_i - V_j)Y_{ij} + V_i(jBc)] \\ &= V_i^2 [G_{ij} + j(B_{ij} + Bc)] - V_i^* V_j (G_{ij} + jB_{ij}) \end{aligned} \quad (3.41)$$

Karena

$$G_{ij} + jB_{ij} = 1 / (R_L + jX_L - jX_C) \quad (3.42)$$

Sehingga daya aktif dan daya reaktif dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3.43)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (B_{ij} + Bc) - V_i V_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (3.44)$$

Dengan cara yang sama, aliran daya aktif dan reaktif dapat dari bus j ke bus i dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{ji} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3.45)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 (B_{ij} + B_c) - V_i V_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (3.46)$$

Rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada jaringan dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} P_L &= P_{ij} + P_{ji} \\ &= V_i^2 G_{ij} + V_j^2 G_{ij} - 2V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \end{aligned} \quad (3.47)$$

$$\begin{aligned} Q_L &= Q_{ij} + Q_{ji} \\ &= -V_i^2 (B_{ij} + B_c) - V_j^2 (B_{ij} + B_c) + 2V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \end{aligned} \quad (3.48)$$

Dengan demikian, alokasi rugi-rugi daya aktif dan reaktif pada masing-masing bus adalah sebagai berikut:

$$P_L = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N \sum_{j \in H_i} \{V_i^2 G_{ij} + V_j^2 G_{ij} - 2V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (3.49)$$

$$Q_L = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^N \sum_{j \in H_i} \{-V_i^2 (B_{ij} + B_c) - V_j^2 (B_{ij} + B_c) + 2V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (3.50)$$

Modifikasi Matriks Y-Bus

Agar dapat dijelaskan dengan baik, asumsi yang digunakan ialah bahwa sistem tenaga mempunyai jumlah total pada bus n , pembangkit g dan beban l , antara bus $1 \sim g$ bus pembangkit dan bus no $g + 1 \sim n$ adalah bus beban. Oleh karena itu, Y -bus dimensi $n \times n$ dapat dibagi menjadi empat submatriks seperti Persamaan (3.51) sebagai berikut.

$$\left[\begin{array}{cc|cc} Y_{1,1} & Y_{1,g} & Y_{1,g+1} & Y_{1,n} \\ & \ddots & & \\ Y_{g,1} & Y_{g,g} & Y_{g,g+1} & Y_{g,n} \\ \hline Y_{g+1,1} & Y_{g+1,g} & Y_{g+1,g+1} & Y_{g+1,n} \\ & \ddots & & \\ Y_{n,1} & Y_{n,g} & Y_{n,g+1} & Y_{n,n} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} V_1 \\ \vdots \\ V_g \\ V_{g+1} \\ \vdots \\ V_n \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} I_1 \\ \vdots \\ I_g \\ I_{g+1} \\ \vdots \\ I_n \end{array} \right] \quad (3.51)$$

Persamaan (3.51) dapat disingkat seperti (3.52) berikut:

$$\left[\begin{array}{cc} YGG & YGL \\ YLG & YLL \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} VG \\ VL \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} IG \\ IL \end{array} \right] \quad (3.42)$$

Tujuan utama penulis di bagian ini ialah menyimpulkan tegangan bus beban sebagai fungsi tegangan bus pembangkit, yaitu $VL = f(VG)$. Konsep ini didasarkan pada teori rangkaian superposisi, di mana daerah setiap tegangan beban terdiri atas sumber tegangan individu dalam rangkaian. Hal ini dianggap perlu, sebab semua beban harus diwakili sebagai admitansi pada rangkaian jika teori diterapkan, akan tetapi beban merupakan injeksi arus yang diperoleh dari daya nyata untuk melakukan analisis aliran daya. Oleh karena itulah beban perlu ditransfer dari arus injeksi ke admitansi ekuivalen dan matriks Y-bus harus dimodifikasi. Beban dapat ditransfer ke admitansi ekuivalen menggunakan bus tegangan yang diketahui dari hasil analisis aliran daya. Sementara itu, kita juga perlu menekankan, bahwa program aliran daya dilakukan untuk memperoleh nilai tegangan, daya aktif, dan daya reaktif pada setiap bus dalam studi sistem. Hal ini perlu dilakukan sebelum kita mengaplikasikan metode ini. Persamaan yang relevan adalah sebagai berikut.

$$YL_j = \frac{1}{VL_j} \left(\frac{SL_j}{VL_j} \right)^* \quad (3.53)$$

SL_j adalah daya nyata beban pada bus j , kemudian YL_j adalah admitansi ekuivalen beban pada bus j , dan VL_j adalah tegangan yang dihasilkan bus j

dalam analisis aliran daya. Persamaan (3.53) digunakan untuk menghitung admitansi ekuivalen Y_{L_j} pada setiap beban untuk kemudian dilakukan modifikasi submatriks $[Y_{LL}]$ di matriks Y-bus asli. Pemoifkasiian dilaksanakan dengan penambahan yang sesuai Y_{L_j} pada elemen diagonal dalam matriks $[Y_{LL}]$, sehingga matriks $[Y_{LL}]$ asli diganti oleh matriks $[Y_{LL}']$. Dengan admitansi ekuivalen menjadi representasi beban, bus beban tidak akan menginjeksi arus, mengurangi submatriks $[I_L]$ pada $[0]$, sehingga Persamaan (3.52) diubah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} Y_{GG} & Y_{GL} \\ Y_{LG} & Y_{LL}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_G \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

Persamaan (3.54) dalam menurunkan separuh matriks digunakan sampai pada

$$[Y_{LG}][V_G] + [Y_{LL}'] [V_L] = [0] \quad (3.55)$$

Selanjutnya fungsi hubungan dapat diperoleh sebagai berikut:

$$[Y_{LL}'] [V_L] = -[Y_{LG}][V_G] \quad (3.56)$$

dan

$$[V_L] = -[Y_{LL}']^{-1} [Y_{LG}][V_G] \quad (3.57)$$

Pada Persamaan (3.57) diasumsikan

$$[Y_A] = -[Y_{LL}']^{-1} [Y_{LG}] \quad (3.58)$$

dan (3.57) ditulis kembali sebagai

$$[V_L] = [Y_A][V_G] \quad (3.59)$$

Tegangan pada tiap bus beban terdiri atas kontribusi tegangan oleh pembangkit individu yang diperluas seperti persamaan sebagai berikut:

$$V_{L_j} = \sum_{i=1}^g Y_{A_{j,i}} * V_{G_i} \quad (3.60)$$

Dengan asumsi,

$$\Delta VL_{i,j} = YA_{j,i} * VG_i \quad (3.61)$$

$\Delta VL_{i,j}$ adalah kontribusi tegangan pada beban j yang diperoleh dari pembangkit i . Persamaan (3.60) juga bisa dinyatakan sebagai berikut.

$$VL_j = \sum_{i=1}^g \Delta VL_{i,j} \quad (3.62)$$

Dengan Persamaan (3.62), kita bisa mengetahui bahwa kontribusi tegangan tiap bus beban yang diterima dari pembangkit individu adalah ΔVL . Kontribusi daya reaktif pada beban j diperoleh dari generator i adalah sebagai berikut:

$$QL_{i,j} = \text{Im} \{ \Delta VL_{i,j} * IL_j * \quad (3.63)$$

IL_j merupakan arus beban untuk membagi daya pada beban dengan cara mengetahui tegangan bus beban dan mengambil *conjugate* pada bentuk kompleks di bus beban j .

Pendapatan kontribusi daya reaktif pada beban j diperoleh dari pembangkit i . Dalam hal ini kita bisa berasumsi bahwa penawaran daya reaktif pembangkit i pada pasar layanan tambahan (*ancillary service market*) C_i . Kemudian biaya beban j harus dibayar pada pembangkit i adalah sebagai berikut.

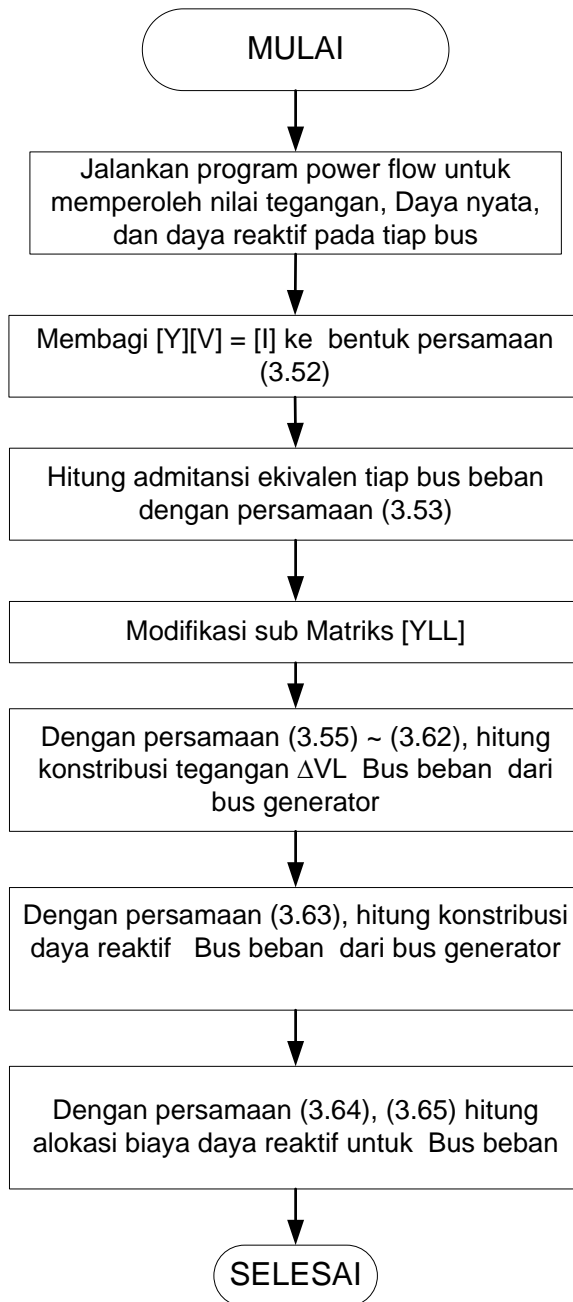
$$CQL_{i,j} = QL_{i,j} * C_i \quad (3.64)$$

$CQL_{i,j}$ adalah biaya daya reaktif beban j yang dibayar pada pembangkit i , sedangkan C_i adalah harga penawaran pembangkit i dalam pasar tambahan.

Dengan menjumlahkan biaya daya reaktif tiap beban yang dibayar pada generator, maka kita bisa menentukan biaya daya reaktif yang dialokasikan pada masing-masing beban. Biaya daya reaktif beban j yang akan dibayar adalah sebagai berikut.

$$CQLL_j = \sum_{i=1}^g CQL_{ij} \quad (3.65)$$

$CQLL_j$ merupakan biaya daya reaktif yang dialokasikan pada beban j . Dan pada intinya, semua prosedur komputasi di atas dapat ditunjukkan dengan ilustrasi *flowchart* di bawah ini.



Gambar 5.5 Flowchart untuk Menghitung Biaya Daya Reaktif

Metode Heuristik

Metode Heuristik merupakan aturan-aturan yang tersusun atas proses tertentu yang membimbing seseorang agar mencapai tujuan. Upaya tersebut didasarkan pada pengalaman (*eksperience*), intuisi (*intuition*) dan pertimbangan-pertimbangan (*judgement*), serta meliputi proses *trial* dan *error*. Artinya, heuristik berkaitan dengan cara berpikir seseorang yang berbasis pada kemampuan analisis dan pengalaman, serta bukan berbasis matematika.

Metode pencarian melibatkan pengembangan jaringan dalam langkah-langkah atau analisis suatu alur keputusan yang sulit dalam *switch* operasi, serta menggunakan *depth-first* atau *best-first* algoritma tertentu. *Best-First* algoritma terkadang disebut dengan pencarian “tamak (*greedy*)”. Pencarian yang tamak atau rakus tidak dapat memastikan suatu jumlah maksimum secara global. Meski begitu, penggunaan dapat disetel jumlah langkah-langkah yang salah dan telah diselidiki untuk rekonfigurasi. *Branch* dan *bound* menjadi algoritma pencarian yang paling luas, namun berbagai heuristik telah diaplikasikan dalam membuat waktu menjalankan yang layak untuk rekonfigurasi. Heuristik menghadirkan aplikasi pertimbangan rancang-bangun tanpa analisis terperinci dari tiap-tiap alternatif, sehingga ia diinginkan di dalam algoritma mana pun [39].

Studi Aliran Daya

Simulasi dilakukan dengan menggunakan data dari sistem IEEE 30 bus. Data IEEE 30 bus terdiri dari 6 bus pembangkit, 24 bus beban serta 41 saluran transmisi. Base yang digunakan dalam perhitungan adalah 100 MVA. Untuk memodifikasi matriks admitansi agar dapat mengikuti matriks seperti pada Persamaan 3.51, maka sistem IEEE 30 bus mengalami perubahan nomor urut bus. Bus pembangkit ditempatkan pada nomor urut pertama secara berurutan. Dengan begitu, data sistem IEEE 30 bus mengalami perubahan menjadi seperti tabel berikut.

Tabel 5.4 Data Pembangkit dan Pembebanan Sistem IEEE 30 Bus dengan Bus Pembangkit Diurutkan

No	Jenis	V (pu)	Pembangkit		Pembebanan	
			P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	Slack	1.060	-	-	-	-
2	PU	1.045	0.4	-	21.7	-
3	PU	1.010	-	-	30.0	-
4	PU	1.082	-	-	-	-
5	PU	1.010	-	-	94.2	-
6	PU	1.071	-	-	-	-
7	PQ	-	-	-	22.8	10.9
8	PQ	-	-	-	2.4	1.2
9	PQ	-	-	-	-	-
10	PQ	-	-	-	5.8	2.0
11	PQ	-	-	-	7.6	1.6
12	PQ	-	-	-	11.2	7.5
13	PU	-	-	-	-	-
14	PQ	-	-	-	6.2	1.6
15	PQ	-	-	-	8.2	2.5
16	PQ	-	-	-	3.5	1.8
17	PQ	-	-	-	9.0	5.8
18	PQ	-	-	-	3.2	0.9
19	PQ	-	-	-	9.5	3.4
20	PQ	-	-	-	2.2	0.7
21	PQ	-	-	-	17.5	11.2
22	PQ	-	-	-	-	-
23	PQ	-	-	-	3.2	1.6
24	PQ	-	-	-	8.7	6.7
25	PQ	-	-	-	-	-
26	PQ	-	-	-	3.5	2.3
27	PQ	-	-	-	-	-
28	PQ	-	-	-	-	-
29	PQ	-	-	-	2.4	0.9
30	PQ	-	-	-	10.6	1.9

Perubahan nomor urut bus mengakibatkan perubahan data jaringan seperti tabel di bawah ini.

Tabel 5.5 Data Jaringan Transmisi Sistem IEEE 30 Bus Setelah Perubahan Urutan Bus

No	Bus1	Bus2	R	X	1/2B
1	1	2	0.0192	0.0575	0.02640
2	1	8	0.0452	0.1852	0.02040
3	2	11	0.0570	0.1737	0.01840
4	8	11	0.0132	0.0379	0.00420
5	2	5	0.0472	0.1983	0.02090
6	2	13	0.0581	0.1763	0.01870
7	11	13	0.0119	0.0414	0.00450
8	5	7	0.0460	0.1160	0.01020
9	13	7	0.0267	0.0820	0.00850
10	13	3	0.0120	0.0420	0.00450
11	13	9	0	0.2080	0
12	13	10	0	0.5560	0
13	9	4	0	0.2080	0
14	9	10	0	0.1100	0
15	11	12	0	0.2560	0
16	12	6	0	0.1400	0
17	12	14	0.1231	0.2559	0
18	12	15	0.0662	0.1304	0
19	12	16	0.0945	0.1987	0
20	14	15	0.2210	0.1997	0
21	16	17	0.0824	0.1923	0
22	15	18	0.1073	0.2185	0
23	18	19	0.0639	0.1292	0
24	19	20	0.0340	0.0680	0
25	10	20	0.0936	0.2090	0
26	10	17	0.0324	0.0845	0
27	10	21	0.0348	0.0749	0
28	10	22	0.0727	0.1499	0
29	21	22	0.0116	0.0236	0
30	15	23	0.1000	0.2020	0
31	22	24	0.1150	0.1790	0
32	23	24	0.1320	0.2700	0
33	24	25	0.1885	0.3292	0
34	25	26	0.2544	0.3800	0
35	25	27	0.1093	0.2087	0
36	28	27	0	0.3960	0
37	27	29	0.2198	0.4153	0
38	27	30	0.3202	0.6027	0
39	29	30	0.2399	0.4533	0
40	3	28	0.0636	0.2000	0.0214
41	13	28	0.0169	0.0599	0.0065

Hasil perhitungan aliran daya sistem IEEE 30 bus dengan metode Newton Raphson menggunakan Matlab 7.0 dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 5.6 Data Hasil Analisis Aliran Daya Sistem IEEE 30 Bus

Bus	Tegangan		Beban		Generator	
	Mag (pu)	Sudut (deg)	Real (MW)	Reactive (MVAR)	Real (MW)	Reactive (MVAR)
1	1.060	0.000	0.000	0.000	261.058	-23.395
2	1.045	-5.518	21.700	0.000	40.000	38.597
3	1.010	-12.079	30.000	0.000	0.000	-3.499
4	1.082	-14.598	0.000	0.000	0.000	29.559
5	1.010	-14.345	94.200	0.000	0.000	15.033
6	1.071	-15.893	0.000	0.000	0.000	33.475
7	1.004	-13.128	22.800	10.900	0.000	0.000
8	1.026	-8.058	2.400	1.200	0.000	0.000
9	1.025	-14.598	0.000	0.000	0.000	0.000
10	1.002	-16.314	5.800	2.000	0.000	0.000
11	1.019	-9.724	7.600	1.600	0.000	0.000
12	1.027	-15.893	11.200	7.500	0.000	0.000
13	1.014	-11.388	0.000	0.000	0.000	0.000
14	1.010	-16.803	6.200	1.600	0.000	0.000
15	1.003	-16.817	8.200	2.500	0.000	0.000
16	1.009	-16.356	3.500	1.800	0.000	0.000
17	0.999	-16.548	9.000	5.800	0.000	0.000
18	0.990	-17.388	3.200	0.900	0.000	0.000
19	0.986	-17.522	9.500	3.400	0.000	0.000
20	0.989	-17.281	2.200	0.700	0.000	0.000
21	0.989	-16.782	17.500	11.200	0.000	0.000
22	0.990	-16.761	0.000	0.000	0.000	0.000
23	0.988	-17.094	3.200	1.600	0.000	0.000
24	0.976	-17.091	8.700	6.700	0.000	0.000
25	0.978	-16.733	0.000	0.000	0.000	0.000
26	0.959	-17.188	3.500	2.300	0.000	0.000
27	0.987	-16.226	0.000	0.000	0.000	0.000
28	1.011	-12.037	0.000	0.000	0.000	0.000
29	0.967	-17.549	2.400	0.900	0.000	0.000
30	0.955	-18.501	10.600	1.900	0.000	0.000

Keterangan:

Total pembangkitan : 301.058 + j89.770 MVA

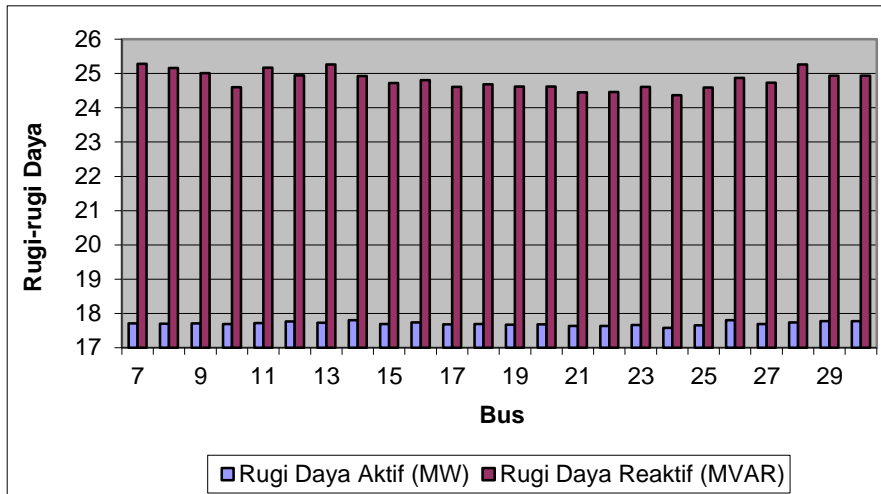
Total pembebanan : 283.400 + j64.500 MVA

Total rugi-rugi saluran : 17.744+j25.534 MVA

Jika sistem tersebut dipasang kapasitor bank untuk mengkompensasi daya reaktif, maka hasil studi aliran daya mengalami perubahan. Letak kapasitor yang paling baik untuk memperoleh rugi-rugi terkecil dapat kita ketahui dengan melakukannya secara heuristik. Heuristik merupakan aturan-aturan yang tersusun dari suatu proses yang membimbing seseorang untuk mencapai tujuan, berdasarkan pengalaman (*eksperience*), intuisi (*intuition*) dan pertimbangan-pertimbangan (*judgement*) dan meliputi proses *trial* dan *error*. Heuristik berkaitan dengan cara berpikir seseorang dengan dasar kemampuan analisis dan pengalaman, bukan berbasis matematika. Rugi-rugi daya pada sistem setelah peletakan kapasitor 10 MVAR secara heuristik ditunjukkan pada tabel dan grafik di bawah ini.

Tabel 5.7 Rugi-Rugi Daya Sistem IEEE 30 Bus Setelah Peletakan Kapasitor 10 MVAR secara Heuristik

Letak Kapasitor	Total Rugi Daya	
	Rugi Daya Aktif (MW)	Rugi Daya Reaktif (MVAR)
Bus 7	17.709	25.288
Bus 8	17.697	25.166
Bus 9	17.707	25.015
Bus 10	17.686	24.603
Bus 11	17.713	25.175
Bus 12	17.763	24.951
Bus 13	17.725	25.262
Bus 14	17.795	24.929
Bus 15	17.687	24.725
Bus 16	17.734	24.808
Bus 17	17.681	24.610
Bus 18	17.690	24.684
Bus 19	17.673	24.618
Bus 20	17.680	24.624
Bus 21	17.627	24.449
Bus 22	17.631	24.461
Bus 23	17.657	24.610
Bus 24	17.578	24.365
Bus 25	17.654	24.589
Bus 26	17.798	24.871
Bus 27	17.684	24.737
Bus 28	17.736	25.263
Bus 29	17.771	24.938
Bus 30	17.774	24.943



Gambar 5.6 Rugi-Rugi Daya Sistem IEEE 30 Bus Setelah Peletakan Kapasitor 10 MVAR secara Heuristik

Berdasarkan metode heuristik di atas, maka untuk memperoleh jumlah rugi-rugi daya terkecil, kapasitor bank yang berkapasitas 10 MVAR diletakkan pada Bus 24. Dengan begitu, maka total rugi daya aktif dapat direduksi dari 17,744 MW menjadi 17,578 MW. Sementara total rugi daya reaktif dapat direduksi dari 25,534 MVAR menjadi 24,365 MVAR.

Alokasi Rugi-Rugi Transmisi

Dengan metode Aliran Daya Newton Raphson, rugi daya aktif dan daya reaktif antar saluran dapat diketahui seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 5.8 Hasil Rugi Daya Antar Saluran Sistem IEEE 30 Bus Tanpa Kapasitor

BUS		DAYA	
FROM	TO	P(MW)	Q(MVAR)
1	2	5.482	10.568
1	8	2.812	7.082
2	5	2.979	8.101
2	11	1.094	-0.584
2	13	2.038	2.222

BUS		DAYA	
FROM	TO	P(MW)	Q(MVAR)
3	13	0.102	-0.564
3	28	0.000	-4.371
4	9	0.000	1.555
5	7	0.144	-1.706
6	12	0.000	1.371
7	13	0.368	-0.601
8	11	0.771	1.336
9	10	0.000	1.307
9	13	-0.000	1.630
10	13	-0.000	1.373
10	17	0.011	0.029
10	20	0.081	0.181
10	21	0.123	0.266
10	22	0.059	0.121
11	12	0.000	4.763
11	13	0.576	1.075
12	14	0.086	0.178
12	15	0.258	0.509
12	16	0.076	0.159
13	28	0.060	-13.116
14	15	0.010	0.009
15	18	0.048	0.098
15	23	0.051	0.103
16	17	0.022	0.052
18	19	0.008	0.015
19	20	0.017	0.033
21	22	0.001	0.001
22	24	0.054	0.083
23	24	0.020	0.042
24	25	0.005	0.009
25	26	0.049	0.072
25	27	0.034	0.064
27	28	0.000	1.493
27	29	0.093	0.176
27	30	0.175	0.330
29	30	0.036	0.068
Total		17.744	25.534

Studi aliran daya yang biasa hanya dapat menghitung rugi-rugi daya antar saluran. Alokasi rugi-rugi daya di masing-masing bus dapat dilakukan menggunakan metode alokasi Z Bus untuk alokasi daya aktif.

Dengan begitu, alokasi daya reaktif pada masing-masing bus perlu dilakukan pengembangan metode. Aplikasi metode aliran daya menggunakan Z bus dapat digunakan untuk alokasi daya reaktif pada masing-masing bus. Alokasi rugi-rugi daya pada masing-masing bus tanpa kapasitor bank dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 5.9 Alokasi Rugi Daya Tanpa Kapasitor pada Setiap Bus Sistem IEEE 30 Bus

Bus	Rugi-Rugi Daya Aktif (MW)	Rugi-Rugi Daya Reaktif (MVAR)
1	11.9720	8.8247
2	0.4209	10.1530
3	0.4402	-2.4674
4	0.0180	0.7774
5	2.2613	3.1976
6	0.1556	0.6854
7	0.4312	-1.1534
8	-0.0177	4.2089
9	0	2.2462
10	0.0635	1.6385
11	0.0221	3.2948
12	0.0078	3.4896
13	0	-3.9903
14	0.0753	0.0939
15	0.1269	0.3597
16	0.0338	0.1054
17	0.1213	0.0407
18	0.0709	0.0569
19	0.2290	0.0243
20	0.0465	0.1070
21	0.3283	0.1334
22	0	0.1028
23	0.0724	0.0723
24	0.2485	0.0669
25	0	0.0727
26	0.1297	0.0362
27	0	1.0315
28	0	-7.9965
29	0.0713	0.1222
30	0.4152	0.1991
Total	17.7440	25.5335

Dengan membandingkan dua tabel di atas, maka dapat kita ketahui bahwa total rugi-rugi daya antar saluran dan total rugi-rugi daya yang dialokasikan di masing-masing bus memiliki jumlah yang sama. Meskipun metode untuk menghitung rugi-rugi daya tersebut berbeda.

Apabila pada bus 24 dipasang kapasitor bank 10 MVAR, maka besarnya alokasi rugi-rugi daya antar saluran dan alokasi rugi-rugi daya pada masing-masing bus mengalami perubahan. Hal ini ditunjukkan pada dua tabel di bawah ini.

Tabel 5.10 Hasil Rugi Daya Antar Saluran Sistem IEEE 30 Bus dengan Kapasitor 10 MVAR

BUS		DAYA	
FROM	TO	P(MW)	Q(MVAR)
1	2	5.472	10.538
1	8	2.810	7.068
2	5	2.974	8.080
2	11	1.090	-0.602
2	13	2.037	2.212
3	13	0.103	-0.561
3	28	0.001	-4.375
4	9	0.000	1.339
5	7	0.140	-1.718
6	12	0.000	1.139
7	13	0.368	-0.603
8	11	0.771	1.332
9	10	0.000	1.158
9	13	0.000	1.663
10	13	0.000	1.348
10	17	0.013	0.033
10	20	0.082	0.183
10	21	0.101	0.217
10	22	0.046	0.094
11	12	0.000	4.687
11	13	0.579	1.084
12	14	0.079	0.164
12	15	0.229	0.451
12	16	0.065	0.138
13	28	0.061	-13.149
14	15	0.007	0.006
15	18	0.046	0.093

BUS		DAYA	
FROM	TO	P(MW)	Q(MVAR)
15	23	0.029	0.058
16	17	0.017	0.040
18	19	0.007	0.014
19	20	0.017	0.034
21	22	0.002	0.005
22	24	0.036	0.056
23	24	0.004	0.009
24	25	0.017	0.030
25	26	0.047	0.070
25	27	0.030	0.058
27	28	0.000	1.412
27	29	0.091	0.172
27	30	0.171	0.323
29	30	0.035	0.067
Total		17.578	24.365

Tabel 5.11 Alokasi Rugi Daya Aktif pada Setiap Bus Sistem IEEE 30 Bus dengan Kapasitor 10 MVAR

Bus	Rugi-Rugi Daya Aktif (MW)	Rugi-Rugi Daya Reaktif (MVAR)
1	11.9690	8.8030
2	0.4075	10.1140
3	0.4366	-2.4683
4	0.0242	0.6693
5	2.2559	3.1811
6	0.1241	0.5695
7	0.4307	-1.1607
8	-0.0176	4.2000
9	0	2.0795
10	0.0621	1.5168
11	0.0218	3.2505
12	0.0122	3.2891
13	0	-4.0030
14	0.0748	0.0848
15	0.1229	0.3041
16	0.0338	0.0886
17	0.1185	0.0363
18	0.0692	0.0536
19	0.2236	0.0240
20	0.0454	0.1086
21	0.3066	0.1112

Bus	Rugi-Rugi Daya Aktif (MW)	Rugi-Rugi Daya Reaktif (MVAR)
22	0	0.0773
23	0.0647	0.0335
24	0.1993	0.0473
25	0	0.0791
26	0.1183	0.0352
27	0	0.9824
28	0	-8.0561
29	0.0690	0.1196
30	0.4049	0.1948
Total	17.7440	24.3651

Dari tabel alokasi rugi daya aktif kapasitor 10 MVAR, dapat kita ketahui bahwa alokasi rugi-rugi daya aktif yang terbesar pada Bus 1 yaitu sebesar 11.9690 MW dari 17.744 MW atau alokasi rugi-rugi daya aktif pada Bus 1 sebesar 67,45% dari total rugi-rugi daya aktif pada sistem. Untuk daya reaktif, alokasi daya terbesar pada Bus 2 yaitu sebesar 10.1140 MVAR dari 24.3651 MVAR atau alokasi rugi-rugi daya reaktif pada Bus 2 adalah 41,51% dari total rugi-rugi daya reaktif pada sistem.

Alokasi rugi-rugi daya aktif pada bus beban tertinggi ialah Bus 7 yaitu sebesar 0.4307 MW atau 2,4% dari total rugi-rugi daya aktif sistem. Sementara besarnya alokasi rugi-rugi daya pada bus beban yang tidak mempunyai beban adalah 0. Kondisi ini terjadi karena metode Z Bus didasarkan pada injeksi arus masing-masing bus. Sementara alokasi rugi-rugi daya reaktif pada bus beban yang tertinggi adalah pada Bus 8 yaitu 4.2000 MVAR atau 17,2% dari total rugi-rugi daya reaktif sistem.

Alokasi Daya Reaktif

Langkah pertama yang harus dilakukan untuk menghitung alokasi daya reaktif dengan metode modifikasi matriks admitansi bus (Y-Bus) ialah menjalankan program aliran daya untuk memperoleh nilai tegangan, daya nyata, dan daya reaktif pada tiap bus. Dari hasil studi aliran daya, maka alokasi daya reaktif pada sistem IEEE 30 Bus dapat dihitung seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini.

Tabel 5.12 Alokasi Daya Reaktif Sistem IEEE 30 Bus Tanpa Kapasitor

Bus	Actual Load (MVAR)	Suplai Dari Generator (MVAR)					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
7	10.9	0.591	1.471	3.671	0.534	4.235	0.397
8	1.2	0.498	0.253	0.264	0.048	0.032	0.104
9	0.0	0	0	0	0	0	0
10	2.0	0.136	0.280	0.635	0.731	0.081	0.137
11	1.6	0.460	0.451	0.349	0.104	0.008	0.228
12	7.5	0.540	0.834	1.127	0.447	0.159	4.393
13	0.0	0	0	0	0	0	0
14	1.6	0.825	0.307	0.236	0.071	0.005	0.155
15	2.5	0.151	0.319	0.727	1.141	0.086	0.077
16	1.8	0.109	0.238	0.562	0.600	0.079	0.212
17	5.8	1.178	1.627	1.819	0.293	0.257	0.626
18	0.9	0.089	0.110	0.100	0.027	0.008	0.567
19	3.4	0.205	0.482	1.156	0.186	1.241	0.131
20	0.7	0.333	0.140	0.123	0.030	0.009	0.065
21	11.2	0.540	1.296	3.218	4.809	0.472	0.864
22	0.0	0	0	0	0	0	0
23	1.6	0.344	0.449	0.480	0.084	0.062	0.180
24	6.7	0.465	0.738	1.032	0.419	0.150	3.897
25	0.0	0	0	0	0	0	0
26	2.3	0.894	0.497	0.549	0.091	0.075	0.194
27	0.0	0	0	0	0	0	0
28	0.0	0	0	0	0	0	0
29	0.9	0.209	0.253	0.252	0.050	0.028	0.108
30	1.9	0.238	0.252	0.138	0.0003	-0.007	1.279

Jika sistem tersebut dipasang kapasitor bank untuk mengkompensasi daya reaktif, maka alokasi daya reaktif di dalamnya mengalami perubahan. Letak kapasitor yang paling baik agar memperoleh rugi-rugi terkecil diketahui menggunakan cara *heuristik* pada aliran daya.

Berdasarkan metode heuristik, maka kapasitor 10 MVAR dipasang pada Bus 24 dengan pertimbangan bahwa jika pemasangan kapasitor pada bus tersebut, diperoleh rugi-rugi daya reaktif dan daya aktif terkecil.

Tabel 5.13 Alokasi Daya Reaktif Sistem IEEE 30 Bus dengan Kapasitor pada Bus 24

Bus	Actual Load (MVAR)	Suplai dari Generator (MVAR)					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
7	10.9	0.591	1.470	3.666	0.534	4.241	0.398
8	1.2	0.498	0.253	0.264	0.048	0.032	0.105
9	0.0	0	0	0	0	0	0
10	2.0	0.136	0.279	0.634	0.731	0.081	0.139
11	1.6	0.460	0.451	0.347	0.104	0.008	0.229
12	7.5	0.539	0.833	1.124	0.447	0.158	4.399
13	0.0	0	0	0	0	0	0
14	1.6	0.826	0.307	0.235	0.071	0.005	0.156
15	2.5	0.151	0.319	0.725	1.141	0.086	0.079
16	1.8	0.109	0.237	0.561	0.600	0.079	0.214
17	5.8	1.179	1.628	1.817	0.293	0.256	0.628
18	0.9	0.089	0.110	0.099	0.027	0.008	0.568
19	3.4	0.205	0.481	1.155	0.186	1.242	0.131
20	0.7	0.334	0.140	0.123	0.030	0.009	0.065
21	11.2	0.540	1.295	3.213	4.812	0.472	0.868
22	0.0	0	0	0	0	0	0
23	1.6	0.344	0.449	0.480	0.084	0.062	0.181
24	6.7	-0.061	-0.295	-0.755	-0.395	-0.152	-1.641
25	0.0	0	0	0	0	0	0
26	2.3	0.895	0.497	0.548	0.090	0.075	0.194
27	0.0	0	0	0	0	0	0
28	0.0	0	0	0	0	0	0
29	0.9	0.209	0.253	0.252	0.050	0.028	0.108
30	1.9	0.237	0.252	0.136	0	-0.007	1.282

Penambahan kapasitor akan mengubah aliran daya dan tegangan sistem. Kontribusi bus generator ke bus beban juga berubah, merefleksikan perubahan pengurangan suplai daya reaktif bus generator ke bus beban. Seperti yang sudah diketahui bahwa kebutuhan daya reaktif Bus 24 sebesar 6.7 MVAR semua disuplai dari kapasitor, sebab kapasitas kapasitor yang dipasang 10 MVAR, sehingga Bus 24 menyuplai daya reaktif ke sistem melalui bus pembangkit. Artinya, Bus 24 tidak membutuhkan suplai daya reaktif dari masing-masing pembangkit setelah pemasangan kapasitor, justru sebaliknya, bus beban 24 yang menyuplai daya reaktif ke pembangkit.

Apabila kapasitor dipasang pada bus beban dengan beban nol, maka alokasi daya reaktif juga mengalami perubahan. Misalnya kapasitor 10 MVAR dipasang pada Bus 22, maka alokasi daya reaktif dapat dilihat seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 5.14 Alokasi Daya Reaktif Sistem IEEE 30 Bus dengan Kapasitor pada Bus 22

Bus	Actual Load (MVAR)	Suplai dari Generator (MVAR)						
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	C
7	10.9	4.561	2.252	2.255	0.312	0.266	0.957	0.298
8	1.2	0.496	0.249	0.252	0.034	0.031	0.104	0.034
9	0.0	0	0	0	0	0	0	0
10	2.0	0.070	0.162	0.388	0.431	0.059	0.161	0.728
11	1.6	0.458	0.447	0.340	0.083	0.008	0.256	0.009
12	7.5	0.501	0.766	0.978	0.247	0.148	4.487	0.373
13	0.0	0	0	0	0	0	0	0
14	1.6	0.158	0.215	0.253	0.079	0.031	1.098	-0.234
15	2.5	1.205	0.490	0.413	0.083	0.026	0.255	0.029
16	1.8	0.063	0.156	0.388	0.653	0.057	0.087	0.396
17	5.8	0.147	0.358	0.875	0.952	0.141	0.446	2.880
18	0.9	0.229	0.250	0.220	0.041	0.017	0.125	0.019
19	3.4	0.297	0.412	0.479	0.124	0.064	2.259	-0.235
20	0.7	0.065	0.145	0.330	0.046	0.036	0.040	0.038
21	11.2	0.706	1.103	1.503	0.441	0.224	6.187	1.037
22	0.0	0	0	0	0	0	0	0
23	1.6	0.057	0.140	0.347	0.582	0.051	0.078	0.347
24	6.7	0.158	0.390	0.956	1.035	1.157	0.511	3.494
25	0.0	0	0	0	0	0	0	0
26	2.3	0.155	0.236	0.300	0.076	0.045	1.379	0.108
27	0.0	0	0	0	0	0	0	0
28	0.0	0	0	0	0	0	0	0
29	0.9	0.404	0.181	0.168	0.028	0.016	0.085	0.018
30	1.9	0.114	0.239	0.527	0.816	0.056	0.111	0.036

Pada pemasangan kapasitor bus beban yang tidak mempunyai beban, bus tersebut akan berubah menjadi bus pembangkit daya reaktif. Tabel di atas menunjukkan, bahwa alokasi daya reaktif dari Bus 22 dalam hal ini suplai daya reaktif dari kapasitor kepada masing-masing bus beban. Dengan adanya kapasitor tersebut, maka suplai daya reaktif masing-

masing pembangkit ke bus beban mengalami penurunan sebab sebagian telah disuplai dari kapasitor.

Alokasi Biaya Daya Reaktif

Setelah mengetahui alokasi daya reaktif dari masing-masing bus pembangkit ke bus beban, maka biaya daya reaktif yang harus dibayar masing-masing pembangkit ke pembangkit juga dapat dihitung. Apabila menggunakan asumsi, bahwa harga daya reaktif pada bursa daya listrik setiap satu MVAR sebesar \$50,-/jam, maka biaya yang harus dibayar masing-masing pembangkit ke beban dapat dilihat pada Tabel Alokasi Daya Reaktif Sistem IEEE 30 Bus dengan Kapasitor pada Bus 24

Tabel 5.15 Alokasi Biaya Daya Reaktif dengan Harga Penawaran Pembangkit Seragam

Bus	Actual Load (MVAR)	Biaya yang Dibayar oleh Beban ke Generator (\$/jam)					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
7	10.9	29.572	73.541	183.54	26.722	211.76	19.862
8	1.2	24.881	12.671	13.203	2.424	1.608	5.213
9	0.0	0	0	0	0	0	0
10	2.0	6.806	13.978	31.77	36.53	4.052	6.863
11	1.6	23	22.558	17.431	5.219	0.407	11.385
12	7.5	26.984	41.684	56.362	22.365	7.937	219.67
13	0.0	0	0	0	0	0	0
14	1.6	41.266	15.345	11.813	3.557	0.259	7.760
15	2.5	7.538	15.946	36.326	57.024	4.297	3.869
16	1.8	5.432	11.88	28.116	29.991	3.960	10.621
17	5.8	58.899	81.35	90.967	14.636	12.83	31.319
18	0.9	4.444	5.494	4.995	1.333	0.390	28.346
19	3.4	10.235	24.087	5781	9.301	62.025	6.542
20	0.7	16.672	6.978	6.158	1.501	0.435	3.257
21	11.2	27.005	64.8	160.91	240.46	23.62	43.214
22	0.0	0	0	0	0	0	0
23	1.6	17.194	22.458	24.02	4.203	3.100	9.025
24	6.7	23.258	36.892	51.594	20.929	7.486	194.84
25	0.0	0	0	0	0	0	0
26	2.3	44.721	24.855	27.43	4.526	3.773	9.695
27	0.0	0	0	0	0	0	0
28	0.0	0	0	0	0	0	0

Bus	Actual Load (MVAR)	Biaya yang Dibayar oleh Beban ke Generator (\$/jam)					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
29	0.9	10.463	12.646	12.613	2.503	1.377	5.398
30	1.9	11.878	12.617	6.880	0.016	-0.344	63.953

Tabel di atas menunjukkan, bahwa masing-masing pihak beban atau konsumen akan membayar biaya atau membeli daya reaktif dari masing-masing pembangkit sesuai dengan kontribusi daya reaktif masing-masing pembangkit ke setiap beban. Apabila harga jual daya masing-masing pembangkit bervariasi, maka biaya pembelian oleh pihak beban akan mengalami perubahan seperti pada tabel di bawah, yang mana diasumsikan harga penawaran setiap satu MVAR untuk G1 = G5 = \$45,-/jam, G2 = G6 = \$40,-/jam serta G3 = G4 = \$50,-/jam.

Tabel 5.16 Alokasi Biaya Daya Reaktif dengan Harga Penawaran Pembangkit Bervariasi

Bus	Actual Load (MVAR)	Biaya yang Dibayar oleh Beban ke Generator (\$/jam)					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
7	10.9	26.614	58.832	183.54	26.722	190.59	15.889
8	1.2	22.393	10.137	13.203	2.424	1.447	4.170
9	0.0	0	0	0	0	0	0
10	2.0	6.125	11.183	31.77	36.53	3.647	5.491
11	1.6	20.483	17.768	16.934	5.382	0.304	9.901
12	7.5	24.285	33.347	56.362	22.365	7.143	175.74
13	0.0	0	0	0	0	0	0
14	1.6	37.139	12.276	11.813	3.557	0.233	6.208
15	2.5	6.784	12.757	36.326	57.024	3.867	3.095
16	1.8	4.889	9.504	28.116	29.991	3.564	8.497
17	5.8	53.009	65.08	90.967	14.636	11.547	25.055
18	0.9	3.999	4.395	4.995	1.333	0.351	22.676
19	3.4	9.212	19.27	57.81	9.301	55.822	5.234
20	0.7	15.004	5.583	6.158	1.501	0.392	2.605
21	11.2	24.304	51.84	160.91	240.46	21.258	34.571
22	0.0	0	0	0	0	0	0
23	1.6	15.475	17.966	24.02	4.203	2.790	7.220
24	6.7	20.932	29.513	51.594	20.929	6.738	155.87
25	0.0	0	0	0	0	0	0
26	2.3	40.249	19.884	27.43	4.526	3.396	7.756

Bus	Actual Load (MVAR)	Biaya yang Dibayar oleh Beban ke Generator (\$/jam)					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
27	0.0	0	0	0	0	0	0
28	0.0	0	0	0	0	0	0
29	0.9	9.417	10.117	12.613	2.503	1.239	4.319
30	1.9	10.69	10.093	6.880	0.016	-0.309	51.162

Dengan membandingkan alokasi biaya daya reaktif dengan harga penawaran pembangkit seragam dan bervariasi, kita bisa simpulkan bahwa harga yang harus dibayar oleh masing-masing beban kepada pembangkit mengalami perubahan sesuai dengan harga penawaran masing-masing pembangkit. Dalam kasus ini, biaya yang harus dibayar oleh pihak beban ke pihak pembangkit G3 dan G4 tetap sama saja, sebab harga penawaran G3 dan G4 sama dengan harga penawaran masing-masing pembangkit.

Tabel 5.17 Alokasi Biaya Daya Reaktif Setelah Pemasangan Kapasitor dengan Harga Penawaran Pembangkit Seragam

Bus	Actual Load (MVAR)	Biaya yang Dibayar oleh Beban ke Generator (\$/jam)					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
7	10.9	29.047	72.713	182.170	27.445	212.520	21.109
8	1.2	24.909	12.494	12.937	2.488	1.569	5.603
9	0.0	0	0	0	0	0	0
10	2.0	6.762	13.848	31.483	36.318	3.992	7.598
11	1.6	22.764	22.203	16882	5.384	0.334	12.433
12	7.5	27.574	42.367	56.783	22.547	7.977	217.750
13	0.0	0	0	0	0	0	0
14	1.6	41.322	15.028	11.353	3.655	0.197	8.445
15	2.5	7.461	15.780	35.993	56.931	4.226	4.611
16	1.8	5.421	11.830	27.955	29.777	3.933	11.044
17	5.8	58.434	80.570	89.716	15.054	12.641	33.586
18	0.9	4.512	5.524	4.927	1.404	0.368	28.265
19	3.4	10.043	23.794	57.334	9.564	62.277	6.990
20	0.7	16.693	6.853	5.974	1.542	0.410	3.528
21	11.2	26.916	64.640	160.680	239.190	23.555	45.017
22	0.0	0	0	0	0	0	0
23	1.6	17.051	22.223	23.646	4.325	3.045	9.709
24	6.7	-3.2967	-15.408	-38.841	-19.480	-7.838	-80.137

Bus	Actual Load (MVAR)	Biaya yang Dibayar oleh Beban ke Generator (\$/jam)					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
25	0.0	0	0	0	0	0	0
26	2.3	44.770	24.544	26.958	4.645	3.701	10.383
27	0.0	0	0	0	0	0	0
28	0.0	0	0	0	0	0	0
29	0.9	10.370	12.498	12.379	2.577	1.343	5.833
30	1.9	12.018	12.575	6.492	0.267	-0.444	64.092

Perubahan alokasi biaya daya reaktif pada tabel di atas menunjukkan, bahwa jika terpasang kapasitor bank 10 MVAR pada Bus 24, maka Bus 24 tidak lagi membayar biaya ke masing-masing pembangkit. Dalam hal ini, Bus 24 membayar biaya daya reaktif kepada pihak penyedia atau yang memasang kapasitor sebesar biaya penawaran daya reaktif yang dikonsumsi dari kapasitor. Bus 24 masih memiliki kelebihan daya reaktif, sebab Bus 24 hanya membutuhkan 6.7 MVAR, sementara besarnya daya reaktif yang diinjeksikan ke Bus 24 adalah 10 MVAR. Jadi masih ada sisa daya, yang nantinya didistribusikan lagi ke bus beban yang lain melalui pembangkit. Dengan demikian, Bus 24 menjual kelebihan daya reaktif kepada masing-masing pembangkit.

Apabila alokasi rugi-rugi transmisi pada bus dipertimbangkan, maka total biaya daya reaktif bus beban ditambah dengan rugi-rugi daya reaktif yang dialokasikan ke masing-masing bus beban sebagaimana tabel di bawah ini.

Tabel 5.18 Alokasi Biaya Daya Reaktif Mempertimbangkan Rugi-Rugi Daya Reaktif

Bus	Biaya Rugi Daya Reaktif (\$/jam)	Biaya yang Dibayar oleh Beban ke Generator (\$/jam)						Total Biaya
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	
7	-57.67	29.572	73.541	183.54	26.722	211.76	19.862	487.327
8	210.445	24.881	12.671	13.203	2.424	1.608	5.213	270.445
9	112.31	0	0	0	0	0	0	112.31
10	81.925	6.806	13.978	31.77	36.53	4.052	6.863	181.924
11	164.74	23	22.558	17.431	5.219	0.407	11.385	244.74

Bus	Biaya Rugi Daya Reaktif (\$/jam)	Biaya yang Dibayar oleh Beban ke Generator (\$/jam)						Total Biaya
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	
12	174.48	26.984	41.684	56.362	22.365	7.937	219.67	549.482
13	-199.515	0	0	0	0	0	0	-199.515
14	4.695	41.266	15.345	11.813	3.557	0.259	7.760	84.695
15	17.985	7.538	15.946	36.326	57.024	4.297	3.869	142.985
16	5.27	5.432	11.88	28.116	29.991	3.960	10.621	95.27
17	2.035	58.899	81.35	90.967	14.636	12.83	31.319	292.036
18	2.845	4.444	5.494	4.995	1.333	0.390	28.346	47.847
19	1.215	10.235	24.087	5781	9.301	62.025	6.542	5894.405
20	5.35	16.672	6.978	6.158	1.501	0.435	3.257	40.351
21	6.67	27.005	64.8	160.91	240.46	23.62	43.214	566.679
22	5.14	0	0	0	0	0	0	5.14
23	3.615	17.194	22.458	24.02	4.203	3.100	9.025	83.615
24	3.345	23.258	36.892	51.594	20.929	7.486	194.84	338.344
25	3.635	0	0	0	0	0	0	3.635
26	1.81	44.721	24.855	27.43	4.526	3.773	9.695	116.81
27	51.575	0	0	0	0	0	0	51.575
28	-399.825	0	0	0	0	0	0	-399.825
29	6.11	10.463	12.646	12.613	2.503	1.377	5.398	51.11
30	9.955	11.878	12.617	6.880	0.016	-0.344	63.953	104.955

Dengan mempertimbangkan rugi-rugi daya reaktif transmisi, maka kita dapat menentukan total pengeluaran biaya daya reaktif masing-masing bus beban yang harus dibayar ke bus masing-masing pembangkit ditambah dengan biaya rugi-rugi daya reaktif yang dialokasikan kepada masing-masing bus beban. Tabel di atas menunjukkan, bahwa jumlah pengeluaran untuk pembayaran daya reaktif masing-masing bus beban dipengaruhi oleh jumlah rugi-rugi daya reaktif yang dialokasikan kepada masing-masing bus beban. Dengan demikian, biaya rugi-rugi daya reaktif tidak boleh diabaikan sebab jumlahnya sangat signifikan.

Intisari

Pada intinya, metode perhitungan rugi-rugi daya dari analisis hasil studi aliran daya hanya dapat mengetahui total rugi-rugi daya sistem dan rugi-rugi daya antar saluran. Metode ini tidak dapat digunakan dalam konteks bursa daya listrik. Aplikasi metode aliran daya dengan Z bus

dapat digunakan untuk alokasi daya reaktif pada masing-masing bus. Untuk memperoleh total rugi-rugi daya terkecil dalam suatu sistem tenaga, peletakan peralatan kompensasi daya reaktif dapat dilakukan menggunakan metode heuristik.

Melalui modifikasi matriks admitansi beban (Y-Bus), kontribusi daya reaktif dari masing-masing pembangkit kepada masing-masing bus beban dapat diketahui. Metode ini dianggap cocok untuk sistem multi pembangkit dan multi beban. Termasuk juga untuk sistem deregulasi tenaga listrik yang telah dilaksanakan di beberapa negara di dunia sejak tahun 1990-an.

Tidak terlepas dari kekurangan yang ada, penulis menyarankan agar rugi-rugi daya dalam sistem transmisi dianggap penting untuk diketahui oleh pihak pengelola sistem tenaga listrik. Hal ini berlaku untuk rugi-rugi antar saluran maupun rugi-rugi yang dialokasikan pada masing-masing bus. Aplikasi metode aliran daya dengan Z Bus merupakan salah satu metode alternatif sederhana untuk mengetahui alokasi rugi-rugi daya transmisi pada masing-masing bus, yang mana dapat diaplikasikan pada semua tipe sistem tenaga listrik. Dan tentu saja lebih sederhana. Selain itu, metode modifikasi matriks Y Bus sudah dianggap sebagai metode alternatif untuk mengetahui sumber-sumber daya reaktif yang dikonsumsi oleh beban dari masing-masing pembangkit. Penulis menilai, bahwa metode ini sangat cocok digunakan untuk sistem tenaga listrik dalam era deregulasi. Penulis berharap pemikiran ini menjadi salah satu solusi bagi pemerintah Indonesia untuk mengatasi permasalahan-permasalahan selama deregulasi energi listrik di masa depan.

Referensi

- [1] Wen Chen Chu, Bin Kwie Chen, and Chung Hsien Liao "Allocating the Cost of Reactive Power Purchased in an Ancillary Service Market by Modified Y-Bus Matrix Method" *IEEE Trans. Power System*, vol. 19, No 1. pp.174–179, February 2004.
- [2] Janusz Bialek, "Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access," *IEEE Trans. Power System*, vol. 12, pp. 1185–1193, Aug. 1997.

- [3] _____ "Allocation of Transmission Supplementary Charge to Real and Reactive Loads," *IEEE Trans. Power System.*, vol. 13, pp. 749–754, Aug. 1998.
- [4] D. Daniel Kirschen, R. Ron Allan, and G. Goran Strbac, "Contributions of Individual Generators to Loads and Flows," *IEEE Trans. Power System.*, vol. 12, pp. 52–60, Feb. 1997.
- [5] G. Goran Strbac, D. Daniel Kirschen, and S. Syed Ahmed, "Allocation Transmission System usage on the basis of Traceable Contributions of Generators and Loads to flows," *IEEE Trans. Power System.*, vol. 13, pp. 527–532, May 1998.
- [6] F. F.Felix F. Wu, Y.Yixin Ni, and P.Ping Wei, "Power transfer Allocation for Open Access Using Graph Theory-Fundamentals and Applications in Systems without Loopflow," *IEEE Trans. Power System.*, vol. 15, pp. 923–929, Aug. 2000.
- [7] Francisco D. Galiana, Antonio J. Conejo, and Ivana Kockar, "Incremental Transmission Loss Allocation Under Pool Dispatch" *IEEE Trans. Power System*, vol. 17, No. 1. pp 26-33, February 2002.
- [8] Janusz W. Bilaek, Stanislaw Ziemianek, and Robin Wallace, "A Methodology for Allocating Transmission Loss Due to Cross-Border Trades". *IEEE Trans. Power System.*, vol. 19, No. 3. pp.1255-1262, August 2004.
- [9] Jin Zhong, Emilia Nobile, Anjan Bose, and Kankar Bhattacharya, "Localized Reactive Power Markets Using the Concept of Voltage Control Areas". *IEEE Trans. Power System.*, vol. 19, No. 3. pp.1555-11561, August 2004.
- [10] A. Conejo, F. D. Galiana, and I. Kockar, "Z-bus loss allocation," *IEEE Trans. Power System.*, vol. 16, pp. 105–110, Feb. 2001.
- [11] A. G. Exposito, J. M. R. Santos, T. G. Garcia, and E. A. R. Velasco, "Fair Allocation of Transmission Power Losses," *IEEE Trans. Power System.*, vol. 15, pp. 184–188, Feb. 2000.
- [12] R.S. Salgado, C.F. Moyano and A.D.R. Medeiros, "Reviewing Strategies for Active Power Transmission Loss Allocation in Power Pools" *ELSEVIER* No. 26. pp 81-90, 2004.

- [13] Jen Hao Teng, "Power Flow and Loss Allocation for Deregulated Transmission Systems" *ELSEVIER* No. 27. pp 327-333, 2005.
- [14] Hadi Saadat, "Power System Analysis" McGRAW-HILL, International Editions 1999.
- [15] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma, "Power system Analysis And Design", Brooks/Cole, Thomson Learning, Third Edition, 2002.
- [16] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation, Operation, and Control", John Wiley & Sons, INC, Third Edition, 2002.
- [17] DM Tarage, "Reactive Power Management", McGRAW-HILL 2004.
- [18] W. Mielczarski, "Quality of Electricity Supply & Management of Network Losses", Puma Press, Melbourne 1997.
- [19] E.L. da Silva, J.J. Hedgecock, J.C.O. Mello, and J.C.F. da Luz, "Practical Cost-Based Approach for the Voltage Ancillary Service," *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 16, No. 4 pp. 806-812, November 2001.
- [20] Antonio J.Conejo, Natalia Alguacil, and Gregorio Fernandez Ruiz, "Allocation of the Cost of Transmission Losses Using a Radial Equivalent Network," *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 18, No. 4, pp. 1353-1358, November 2003.
- [21] A. El-Keib and X. Ma, "Calculating Short-Run Marginal Costs of Active and Reactive Power Production," *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 12, No.2, pp. 559-565, May 1997.
- [22] Yifeng Li, "Bulk System Reliability Evaluation in A Deregulated Power Industry" A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in the Department of Electrical Engineering University of Saskatchewan, Saskatoon 2003.
- [23] Rezaul Haque, "Transmission Loss Allocation Using Artificial Neural Networks" A Thesis Submitted to the College of Graduate Studies and Research in the Department of Electrical Engineering University of Saskatchewan, Saskatoon March 2006.
- [24] R.S. Fang, A.K. David, "Optimal Dispatch Under Transmission Contracts", *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume14, No.3, pp.732-737, May 1999.

- [25] Qifeng Ding, “*Optimal Meter Placement and Transaction-Based Loss Allocation in Deregulated Power System Operation*”, A Dissertation Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University, December 2004.
- [26] Jiuping Pan, Yonael Teklu, “Review of Usage-Based Transmission Cost Allocation Methods under Open Access”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 15, No. 4, pp. 1218-1224, November 2000.
- [27] Hui Niu, “*Models for Electricity Market Efficiency and Bidding Strategy Analysis*”, Dissertation Presented to the Faculty of the Graduate School in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy, of The University of Texas at Austin, May 2005
- [28] Fred I. Denny, David E. Dismukes, “*Power System Operations and Electricity Markets*”, CRC Press LLC, 2002
- [29] Mohamed E. El-Hawary, “*Electrical Energy Systems*”, CRC Press LLC, 2000
- [30] Syed Ahmed, Goran Strbac, “A Method for Simulation and Analysis of Reactive Power Market”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 15, No. 3, pp. 1047-1052, August 2000
- [31] George Gross, Shu Tao, “A Physical-Flow-Based Approach to Allocating Transmission Losses in a Transaction Framework” *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 15, No. 2, pp. 631-637, May 2000.
- [32] Shangyou Hao, Alex Papalexopoulos, “Reactive Power Pricing and Management” *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 12, No. 1, pp. 95-104, February 1997.
- [33] K. Bhattacharya and J. Zhong, “Reactive power as an ancillary service,” *IEEE Trans. Power Syst.*, Volume 16, No. 2, pp. 294–300, May 2001.
- [34] F. Gubina, D. Grgic, and I. Banic, “A Method for Determining the Generators’ Share in a Consumer Load”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 15, No. 4, pp. 1376-1381, Nov. 2000.

- [35] A. Fradi, S. Brignone and B. F. Wollenberg, "Calculation of Energy Transaction Allocation Factors", *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume 16, No. 2, pp. 266-272, May 2001.
- [36] S. Tao and G. Gross, "Transmission Loss Compensation in Multiple Transaction Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 3, pp. 909-915, August 2000.
- [37] V. Lim, T.K. Saha, T. Downs, "Loss Allocation Based Network Reduction in Deregulated Electricity Market", Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004), 26-29 September 2004, Brisbane, Australia.
- [38] Zuwei Yu, D. Lusan, "Optimal Placement of FACTS Device in Deregulated Systems Considering Line Losses" *ELSEVIER* No. 26. pp 813-819, 2004.
- [39] Thomas E. McDermott, "A Heuristic Nonlinear Constructive Method for Electric Power Distribution System Reconfiguration", Dissertation submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia, 1998.
- [40] A.J. Conejo, J.M. Arroyo, N. Alguacil, dan L. Guijarno "Transmission Loss Allocation: A Comparison of Different Practical Algorithms". *IEEE Trans. Power System.*, vol. 17, No. 3. pp.571-576, August 2002.

Bagian 6

Pengaturan Kecepatan Motor Sinkron dengan *Hybrid Volt* dan *PI Controller*

Ramly Rasyid, S.T., M.T.
ramlyteknik@gmail.com

Motor sinkron merupakan motor listrik yang berputar dengan kecepatan konstan berdasarkan frekuensi yang mencatunya. Motor sinkron dapat dioperasikan dengan faktor daya yang bervariasi melalui pengaturan arus penguatannya [6].

Dari hasil survei, jika motor dioperasikan dengan kecepatan variabel, maka daya yang dikonsumsi menjadi lebih kecil sekaligus dapat memperbaiki kualitas dan kuantitas produk, dan juga umur mesin bisa lebih panjang [7,15]. Karena itulah motor sinkron dioperasikan dengan kecepatan variabel melalui pengaturan frekuensinya. Untuk menghasilkan kecepatan variabel, dibutuhkan konverter daya dan analisisnya dibutuhkan model *dqn*. Biasanya pengaturan kecepatan dilakukan secara otomatis sehingga dalam hal ini digunakan rangkaian *close loop*, sementara untuk memperbaiki responsnya digunakan suatu kontroler.

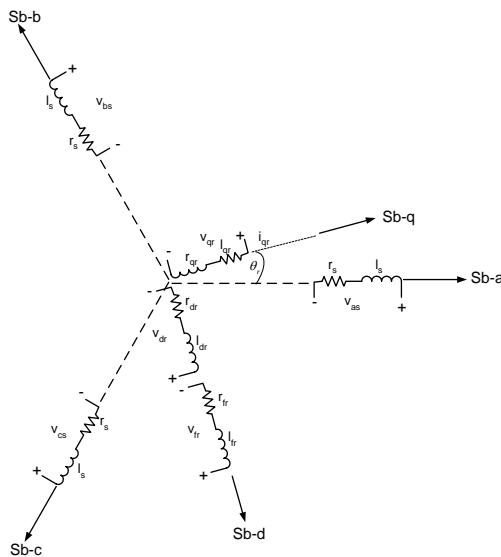
Salah satu strategi pengaturan kecepatan motor sinkron ialah penggunaan metode *volt/hertz* [2, 10]. Sayangnya pada kecepatan rendah, nilai tahanan stator dalam penggunaan metode ini sangat besar yang mana menyebabkan drop tegangan sehingga terjadi kejenuhan. Artinya, perlu dilakukan kompensasi untuk menaikkan tegangannya dengan menambahkan sensor arus. Metode kontrol ini merupakan *hybrid* dari *volt/hertz* dan sensor *current*.

Bagian ini kita akan fokus pada pengaturan kecepatan motor sinkron bermetode *Hybrid Volt/Hertz-Current* menggunakan *PI Controller* yang dapat dioperasikan pada kecepatan rendah sampai tinggi. Sebelum itu, terlebih dahulu kita telaah motor sinkron yang dioperasikan dengan

inverter enam langkah. Penulis berharap aplikasi motor sinkron dapat diterapkan lebih luas dalam dunia industri.

Persamaan Motor Sinkron dalam Sistem Koordinat Bebas

Dengan mengetahui persamaan-persamaan pada motor sinkron, maka akan mudah bagi kita untuk meninjau sistem agar bisa bekerja dengan baik. Rangkaian tiga fasa motor sinkron di mana sumbu stator dan rotor dalam sistem koordinat bebas yang identik dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 6.1 Sumbu Stator dan Rotor Motor Sinkron dalam Sistem Koordinat Bebas

Dinyatakan oleh persamaan [5, 6, 12]:

$$V_{as} = r_s i_{as} + L_s \cdot p i_{as} \quad (2.1)$$

$$V_{bs} = r_s i_{bs} + L_s \cdot p i_{bs} \quad (2.2)$$

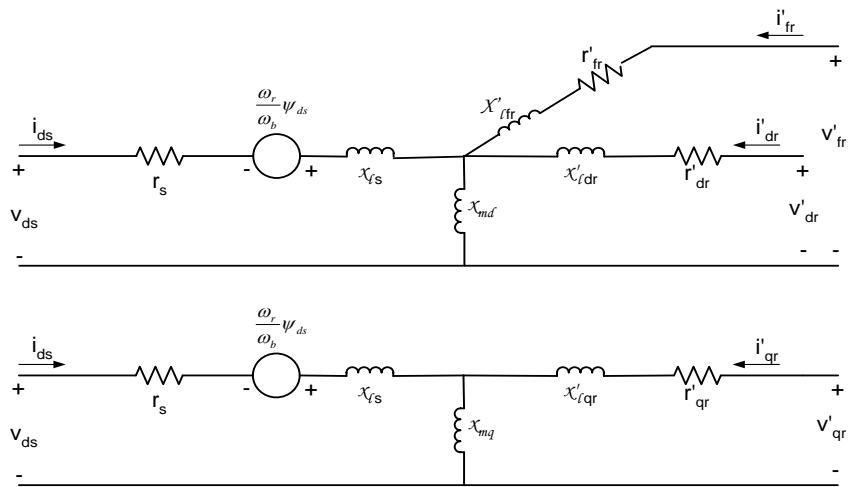
$$V_{ac} = r_s i_{cs} + L_s \cdot p i_{cs} \quad (2.3)$$

di mana:

$$p = \frac{d}{dt} \quad (2.4)$$

Model d-q dari Motor Sinkron

Model rangkaian ekuivalen d-q dari motor sinkron diperlihatkan pada gambar berikut.



Gambar 6.2 Rangkaian Ekuivalen d-q dari Motor Sinkron Kutub Menonjol

Persamaan tegangannya dinyatakan sebagai berikut [5, 7, 9]:

$$\bar{V}_{qs} = r_s \bar{i}_{qs} + p \bar{\lambda}_{qs} + \omega \bar{\lambda}_{qs} \quad (2.5)$$

$$\bar{V}_{ds} = r_s \bar{i}_{ds} + p \bar{\lambda}_{ds} + \omega \bar{\lambda}_{ds} \quad (2.6)$$

$$\bar{V}_{ns} = r_s \bar{i}_{ns} + p \bar{\lambda}_{ns} \quad (2.7)$$

Persamaan tegangan sistem motor sinkron tiga fasa kutub dua dinyatakan sebagai berikut:

$$\bar{V}_{abcs} = \bar{r}_s \bar{i}_{abcs} + \rho \bar{\lambda}_{abcs} \quad (2.8)$$

$$\bar{V}_{qdr} = \bar{r}_r \bar{i}_{qdr} + \rho \bar{\lambda}_{qdr} \quad (2.9)$$

$$\bar{r}_s = \begin{pmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$\bar{r}_r = \begin{pmatrix} r_{qr} & 0 & 0 \\ 0 & r_{dr} & 0 \\ 0 & 0 & r_{fr} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Subskrip s menyatakan belitan stator, r menyatakan belitan rotor, d dan q berturut-turut menyatakan kuantitas pada sumbu d (*direct axis*) dan sumbu q (*quadratur axis*). Notasi r_{qr} , r_{dr} , dan r_{fr} berturut-turut terhadap sumbunya masing-masing, sementara r_s adalah reaktansi stator dan r_r adalah reaktansi rotor.

Rangkaian diasumsikan dalam kondisi seimbang, sementara arus dan tegangan rotor sumbu netral selalu berharga nol, serta komponen netralnya diabaikan.

$$\bar{V}_{abcs} = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T \quad (2.12)$$

$$\bar{V}_{qdr} = [V_{qr} \ V_{dr} \ V_{fr}]^T \quad (2.13)$$

Rangkaian ini ditunjukkan dalam *term* variabel fluks *linkage* yang didefinisikan sebagai berikut:

$$\lambda_{abcs} = \bar{L}_s \bar{i}_{abcs} + \bar{L}_r \bar{i}_{qdr} \quad (2.14)$$

$$\lambda_{qdr} = (\bar{L}_{sr})^T \bar{i}_{abcs} + \bar{L}_r \bar{i}_{qdr} \quad (2.15)$$

$$L_s = (\bar{L}_{s1} + \bar{L}_{s2}) \quad (2.16)$$

Matriks L_{s1} memiliki elemen yang terkait dengan induktansi bocor setiap kumparan stator, yang diberi notasi L_{1s} dan induktansi bersama (*mutual*) stator, yang notasinya L_{ms} . Sehingga matriks L_{s1} dapat ditulis sebagai berikut.

$$L_{s1} = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms} / 2 & -L_{ms} / 2 \\ -L_{ms} / 2 & L_{s1} + L_{ms} & -L_{ms} / 2 \\ -L_{ms} / 2 & -L_{ms} / 2 & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Sementara matriks L_{s2} muncul karena adanya efek penonjolan kutub-kutub motor. Matriks L_{s2} dinyatakan sebagai berikut.

$$L_{s2} = L_{ps} \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos 2\theta \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos 2\theta & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Notasi L_{ps} adalah harga maksimum induktansi karena penonjolan kutub. Matriks L_r dapat dilihat pada persamaan (2.28) yang berhubungan langsung dengan distribusi fluks pada rotor hasil dari kumparan-kumparannya sendiri. Elemen-elemen di dalamnya terdiri dari L_{1qr} , L_{1dr} dan L_{1fr} yang berturut-turut merupakan induktansi bocor pada kumparan q , d , dan f pada sumbu rotor. Sementara elemen L_{mr} merupakan induktansi bersama dari rotor. Matriks L_{sr} muncul karena terjadi gandengan fluks bersama antara stator dengan rotor. Jika $\vartheta = \omega t$ adalah sudut antara sumbu stator dengan rotor, maka matriks L_{sr} dapat dinyatakan pada persamaan (2.29) sebagai berikut.

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_{mr} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1dr} + L_{mr} & -L_m / 2 \\ 0 & -L_m / 2 & L_{1fr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{srq} \cos \theta & L_{srd} \sin \theta & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{srq} \cdot \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_{srd} \cdot \sin(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_{srf} \cdot \sin(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{srq} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & L_{srd} \cdot \sin(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & L_{srf} \cdot \sin(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Persamaan fluks magnetik dari motor sinkron dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \lambda'_{qs} \\ \lambda'_{ds} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{fr} \\ \lambda'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{1s} + L_{mq} & 0 & L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{1s} + L_{md} & 0 & L_{md} & L_{md} \\ L_{mq} & 0 & L_{1qr} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 & L_{1fr} + L_{md} & L_{md} \\ 0 & L_{md} & 0 & L_{md} & L_{1dr} + L_{md} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$L_q = L_{1s} + L_{mq} \quad (2.31)$$

$$L_d = L_{1s} + L_{md} \quad (2.32)$$

$$L_{qr} = L_{1qr} + L_{mq} \quad (2.33)$$

$$L_{dr} = L_{1dr} + L_{md} \quad (2.34)$$

$$L_{fr} = L_{1fr} + L_{md} \quad (2.35)$$

Persamaan *Park's* motor sinkron tiga fasa dalam sumbu *d-q-n* pada kerangka acuan rotor adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \\ V_{fr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + L_{\lambda s} + L_{mq} & L_{\lambda s} + L_{md} & L_{mq} & r.L_{md} & r.L_{md} \\ -r.(L_{\lambda s} + L_{mq}) & r_s + L_{\lambda s} + L_{md} & -r.L_{mq} & L_{md} & L_{md} \\ L_{mq} & 0 & r_{qr} + (L_{\lambda qr} + L_{mq}) & 0 & 0 \\ 0 & L_{md} & 0 & r_{dr} + (L_{\lambda fr} + L_{md}) & L_{md} \\ 0 & L_{md} & 0 & L_{md} & r_{fr} + (L_{\lambda dr} + L_{md}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qs} \\ i'_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{fr} \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$\begin{bmatrix} u_{qs} \\ u_{ds} \\ 0 \\ 0 \\ u_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{qs} & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{ds} & \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{mq} & \frac{\omega_r}{\omega_b} X_{md} \\ -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{qs} & r_s + \frac{p}{\omega_b} X_{ds} & -\frac{\omega_r}{\omega_b} X_{mq} & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & \frac{p}{\omega_b} X_{md} \\ \frac{p}{\omega_b} X_{mq} & 0 & r_{sq} + \frac{p}{\omega b} X_{qs} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & 0 & r_{dr} + \frac{p}{\omega b} X_{dr} & \frac{p}{\omega_b} X_{md} \\ 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & 0 & \frac{p}{\omega_b} X_{md} & r_{fr} + \frac{p}{\omega_b} X_{fr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Torka Elektromagnetik

Mengacu dari rangkaian ekuivalen, motor sinkron kutub menonjol “*cross product*” dalam hal ini artinya antara arus-arus stator dan fluks bersama strator dan celah udara. Secara vektoris, persamaan torka elektromagnetik dapat ditulis sebagai berikut.

$$T_e = \frac{3P}{2} (\lambda_{qs} \cdot i_{qs} - \lambda_{ds} \cdot i_{ds}) \quad (2.38)$$

Sedangkan persamaan fluks *linkage* adalah:

$$\psi_{qs} = \omega_b \cdot \lambda_{qs} = X_{qs} \cdot i_{qs} + X_{mq} \cdot i'_{qr} \quad (2.39)$$

$$\psi_{ds} = \omega_b \cdot \lambda_{ds} = X_{ds} \cdot i_{ds} + X_{mq} \cdot i'_{dr} + X_{md} \cdot i'_{fr} \quad (2.40)$$

$$\psi'_{qr} = \omega_b \cdot \lambda'_{qr} = X_{mq} \cdot i_{ds} + X'_{qr} \cdot i'_{qr} \quad (2.41)$$

$$\psi'_{dr} = \omega_b \cdot \lambda'_{dr} = X_{mq} \cdot i_{ds} + X'_{dr} \cdot i'_{dr} + X_{md} \cdot i'_{fr} \quad (2.42)$$

$$\psi_{fr} = \omega_b \cdot \lambda'_{fr} = X_{md} \cdot i_{ds} + X_{md} \cdot i'_{dr} + X_{fr} \cdot i'_{fr} \quad (2.43)$$

Dengan menyubstitusikan hubungan fluks dalam term arus, maka didapat:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{\omega_b} \left[X_{md} (i'_{fr} + i'_{dr}) i_{ds} - X_{mq} i'_{qr} i_{ds} + (X_{ds} - X_{qs}) i_{ds} i_{qs} \right] \quad (2.44)$$

yang memosisikan bukti dari tiga komponen torka

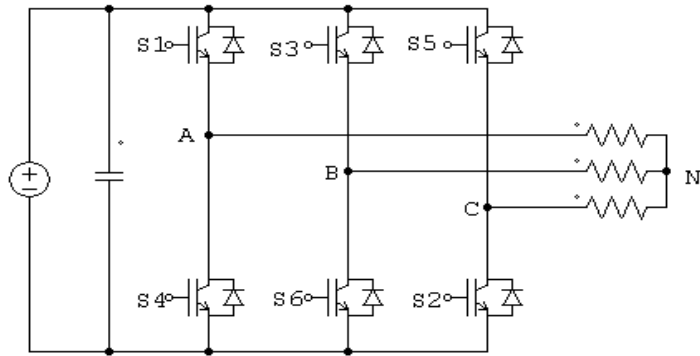
1. $X_{md} (i'_{fr} + i'_{dr}) i_{ds}$ - torka medan tambahan – torka d – peredam (*damper*)
2. $X_{mq} i'_{qr} i_{ds}$ - torka q – peredam
3. $(X_{ds} - X_{qs}) i_{ds}$ - torka reluktansi

Voltage Source Inverter Enam Langkah

Voltage Source Inverter (VSI) enam langkah diterapkan untuk mengatur frekuensi dan tegangan dari sumber. Hal ini karena kecepatan motor sinkron berbanding lurus dengan frekuensi yang diberikan, sehingga kecepatan motor sinkron dapat diatur dengan mengubah-ubah frekuensi sumber melalui *inverter* [10, 13].

Arah arus pada konverter tidak dapat dibalik, sehingga digunakan *inverter* untuk membalik tegangan rata-rata yang keluar dari konverter. Dengan mengatur sudut penyalaan, konverter dapat dioperasikan pada mode inversi yakni pada saat nilai $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ [11].

Agar tegangan dapat diubah dari DC ke AC, maka setiap IGBT dinyalakan di setiap setengah periode, namun dengan awal penyalaan masing-masing IGBT yang berbeda. Gambar di bawah menunjukkan, bahwa tiap IGBT dihubungkan secara anti paralel dengan sebuah dioda. Fungsi dari dioda adalah "*Free Wheeling Dioda*" yakni untuk melepas energi yang tersimpan dalam induktansi dari beban saat terjadi *switching*.



Gambar 6.3 Konfigurasi rangkaian VSI enam langkah

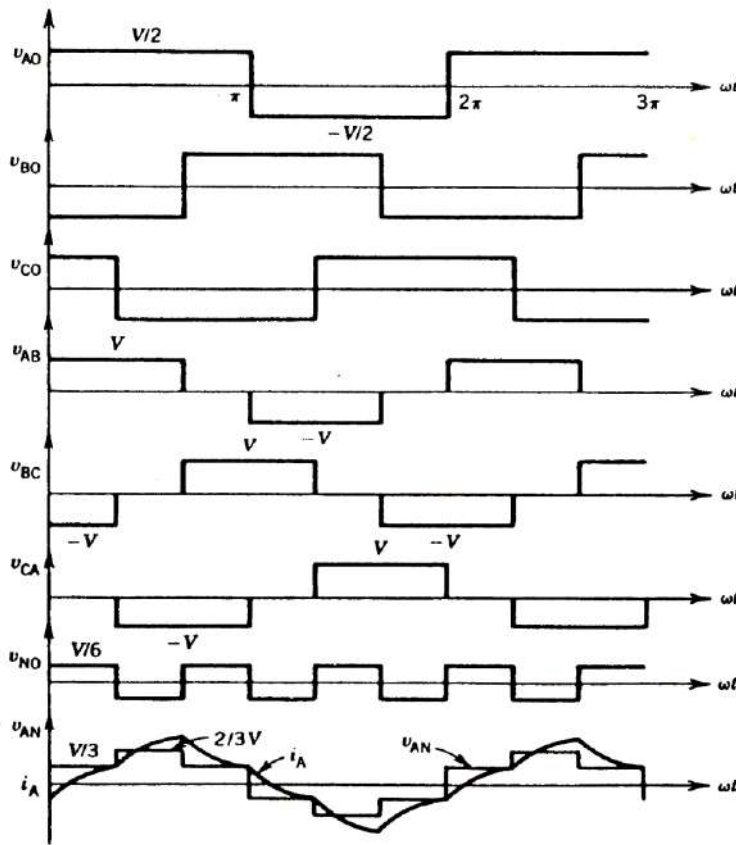
VSI tiga fasa dari gambar di atas menunjukkan, bahwa beban dihubungkan bintang dan fasa antara kutub digeser 120° . Kutub tegangan v_{AO} , v_{BO} , dan v_{CO} dapat dilihat pada gambar di bawah ini. Jika S_1 dinyalakan pada $\omega t = 0$, kutub A dihubungkan ke bus positif dari DC sumber, sehingga $v_{AO} = V/2$. Jika S_4 dinyalakan pada $\omega t = \pi$, kutub A dihubungkan dengan bus negatif pada DC sumber sehingga $v_{AO} = -V/2$. Bentuk gelombang dari v_{BO} dan v_{CO} akan identik dengan v_{AO} apabila sudut-sudut keduanya digeser 120° [10, 13].

Tegangan-tegangan line dan tegangan-tegangan kutub dapat dituliskan sebagai berikut:

$$v_{AB} = v_{AO} - v_{BO} \quad (2.45)$$

$$v_{BC} = v_{BO} - v_{CO} \quad (2.46)$$

$$v_{CA} = v_{CO} - v_{AO} \quad (2.47)$$



Gambar 2.4. Bentuk Gelombang Tiga Fasa dari VSI Enam Langkah

Grafik dari tegangan-tegangan *line* dapat dilihat pada gambar di atas. Tegangan-tegangan ini merupakan gelombang kotak 120° . Tegangan-tegangan kutub dapat ditulis sebagai berikut [4, 10].

$$V_{AO} = V_{AN} + V_{NO} \quad (2.48)$$

$$V_{BO} = V_{BN} + V_{NO} \quad (2.49)$$

$$V_{CO} = V_{CN} + V_{NO} \quad (2.50)$$

Untuk operasi tiga fasa yang seimbang:

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad (2.51)$$

Dari persamaan-persamaan (2.48), (2.49), (2.50) dan (2.51) diperoleh:

$$v_{NO} = \frac{v_{AO} + v_{BO} + v_{CO}}{3} \quad (2.52)$$

Pada bentuk gelombang tegangan beban netral dan suplai netral v_{NO} , grafik dibuat dari tegangan kutub seperti gambar di atas. Perubahan-perubahan tegangan dari tiga frekuensi waktu pada keluaran tegangan *inverter* [3,11].

Tegangan-tegangan fasa beban dapat diperoleh apabila persamaan (2.52) disubstitusikan dalam persamaan (2.48), (2.49), (2.50) dan (2.51) didapatkan sebagai berikut.

$$v_{AN} = v_{OC} - v_{NO} = \frac{2}{3}v_{OC} - \frac{1}{3}(v_{BO} + v_{CO}) \quad (2.53)$$

$$v_{BN} = v_{BO} - v_{NO} = \frac{2}{3}v_{BO} - \frac{1}{3}(v_{AO} + v_{CO}) \quad (2.54)$$

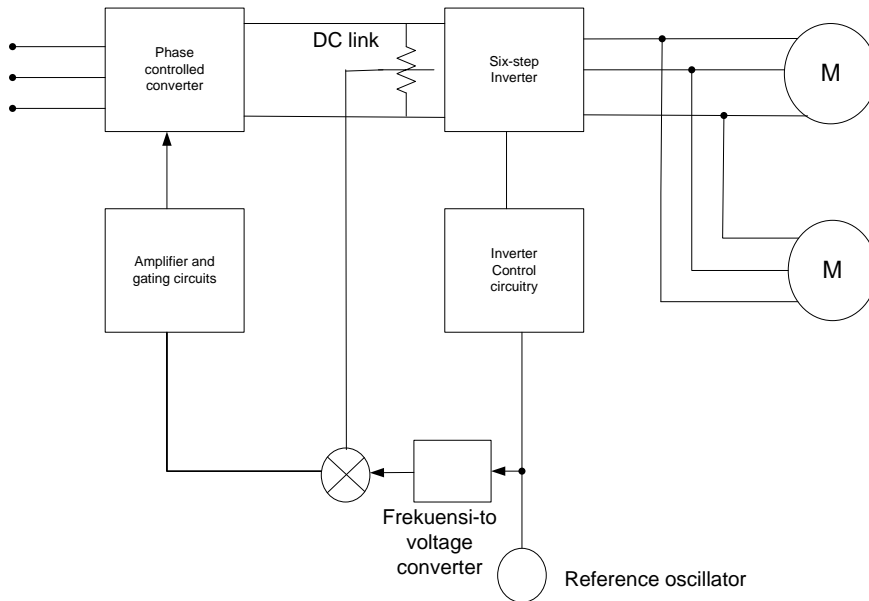
$$v_{CN} = v_{CO} - v_{NO} = \frac{2}{3}v_{CO} - \frac{1}{3}(v_{AO} + v_{BO}) \quad (2.55)$$

Tegangan fasa beban (seperti v_{AN}) memiliki grafik seperti pada gambar bentuk gelombang tiga fasa dari VSI enam langkah.

Strategi Pengendalian Motor AC dengan VSI Enam Langkah

Pengaturan keluaran yang berkaitan dengan tegangan/frekuensi pada *inverter* enam langkah dapat dicapai dengan dua tahapan utama. Pertama, mengontrol langsung frekuensi keluaran dengan mengatur tegangan yang sesuai. Kedua, mengontrol langsung tegangan keluaran dengan frekuensi yang mengikuti perubahan tegangan.

Pengaturan langsung frekuensi dilakukan apabila *inverter* enam langkah dipasang pada satu atau lebih motor sinkron permanen magnet atau motor sinkron tipe *reluctance* yang mana membutuhkan kecepatan akurat dan mengabaikan performansi transien. Ketepatan dan kestabilan frekuensi keluaran diperoleh melalui pengaturan *switching inverter* dengan sebuah osilator referensi seperti gambar di bawah ini.



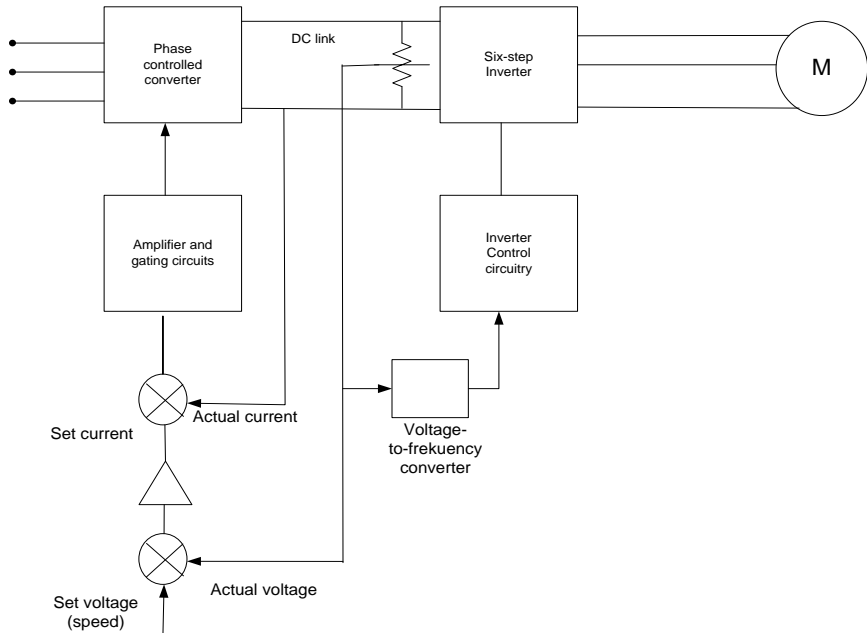
Gambar 6.4 Operasi dari *Inverter* Enam Langkah dengan Mengontrol Langsung

Frekuensi *Inverter*

Ketepatan frekuensi keluaran diubah untuk ketepatan kecepatan *shaft* pada mesin sinkron. Dengan begitu, maka diperoleh kecepatan yang sangat baik tanpa *feedback*. Kontrol frekuensi secara langsung memastikan bahwa frekuensi dan kecepatan tidak akan berubah saat beban dimasukkan atau motor dioperasikan. Tegangan *DC link* akan berubah sesuai dengan frekuensi beban untuk memberikan hubungan yang diinginkan dari volt/hertz motor.

Sebuah sistem *close loop* untuk pengontrolan tegangan dijelaskan seperti pada gambar di bawah ini. Tegangan referensi dari konverter frekuensi ketegangan dibandingkan dengan bagian tertentu tegangan DC. Perbedaan ini diperkuat melalui penggunaan *amplifier* serta pengaturan sudut penundaan penyearah sehingga keluaran volts/hertz diperoleh. Diagram kontrol yang sama digunakan pada *DC chopper*. Sistem pengaturan juga harus memastikan bahwa frekuensi referensi tidak

bertambah ketika motor tidak mampu mengikuti atau mengurangi energi DC link [10].



Gambar 6.5 Operasi dari *Inverter* Enam Langkah dengan Mengontrol Langsung

Tegangan DC Link

Kontrol tegangan secara langsung dengan frekuensi *inverter* bergantung pada tegangan. Strategi pengaturan yang diputuskan harus cocok untuk motor induksi yang akurasi kecepatannya tidak diperhitungkan. *Inverter* komersial enam langkah menggunakan teknik kontrol ini. Implementasi di kalangan industri menunjukkan, bahwa respons dinamik yang cepat tidak dibutuhkan. Konverter *phase-controlled* atau DC *chopper* mengatur tegangan DC pada respons untuk sinyal referensi kecepatan pada regulator tegangan *closed-loop*. Fungsi dari tegangan DC link ialah untuk memperoleh frekuensi keluaran dan kecepatan *shaft*.

Daya keluaran dari motor dianggap sebanding dengan nilai perkalian dari torka *shaft* dan kecepatan. Daya input ke *inverter* merupakan perkalian dari tegangan DC *link* dengan arus. Kecepatan *shaft* dianggap sebanding dengan frekuensi dan tegangan DC *inverter* dengan jenis kontrol ini. Konsekuensi yang muncul ialah, bahwa arus DC *link* kira-kira sebanding dengan torka *shaft* dan fungsi pembatas arus sebagai pengatur torka.

Pada saat *starting* dari kondisi *standstill* (benar-benar diam), kontrol arus bertindak untuk membatasi arus pada nilai beban penuh (*full-load*) melalui pengurangan tegangan input *inverter*. Pengurangan frekuensi eksitasi stator sendiri menyebabkan motor memiliki frekuensi rotor yang rendah dan input *power* faktor yang besar, serta membuat torka *starting* yang besar pada arus nominal. Ketika kecepatan motor meningkat, kontrol arus akan mengatur tegangan. Frekuensi naik secara perlahan dan motor terus menerus dioperasikan dengan frekuensi motor yang rendah. Melalui pembatasan pengoperasian motor pada frekuensi slip yang rendah, torka keluaran per ampere di dalam kondisi ini akan bernilai maksimal dan rating *inverter* sangat dekat dengan motor.

Pada kondisi beban normal, arus lebih kurang dari nilai yang telah dibatasi, sementara sistem berada pada pengaturan tegangan dengan kecepatan referensi yang menghasilkan tegangan terminal, frekuensi keluaran dan kecepatan *shaft*. Apabila torka beban lebih besar dari torka limit, sistem kembali pada kondisi kontrol arus. Setelah itu, tegangan dan frekuensi *inverter* akan mengurangi batas arus motor dan torka pada nilai beban penuh.

Pengaturan kecepatan motor induksi dari tanpa beban ke kondisi beban penuh dapat diperbaiki menggunakan teknik kompensasi slip [5, 10]. Teknik ini mencakup penjumlahan arus yang kecil tergantung bentuk dari sinyal referensi kecepatan, sehingga tegangan dan frekuensi keluaran meningkat dengan peningkatan beban serta mengkompensasi peningkatan slip motor. Kecepatan mendekati 1 persen dari kecepatan maksimum dapat diperoleh menggunakan metode ini.

Penggunaan tegangan *inverter* untuk memperoleh frekuensi memiliki keuntungan sebab saturasi magnetik tidak akan terjadi meskipun dalam kondisi *transient*. Hal ini karena frekuensi secara cepat mengikuti perubahan tegangan. Pengurangan tiba-tiba pada sinyal referensi kecepatan tidak akan menghasilkan pengurangan frekuensi sebab energi dibangkitkan oleh *DC link*, sehingga kenaikan tegangan dan konsekuensinya meningkatkan frekuensi *inverter*.

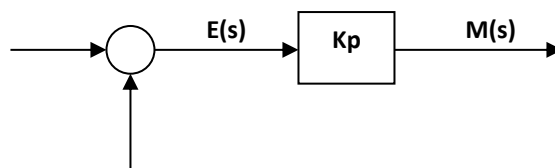
Kontroler Proporsional Integral (PI)

Dalam sebuah sistem kontrol, kontrol berperan sangat besar terhadap perilaku sistem. Salah satu fungsi kontrol yakni memperkecil sinyal *error* akibat perilaku sistem, yaitu perbedaan antara sinyal referensi dengan sinyal aktual. Dari sistem kontrol diharapkan mendapatkan sinyal aktual yang mendekati sinyal referensi yang kita berikan.

Kontroler yang digunakan di sini ialah kontroler PI (Proporsional-Integral), jenis kontroler yang paling banyak digunakan dalam sistem kontrol.

Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional menghasilkan *output* yang sebanding dengan besar sinyal *error*. Keluaran kontroler proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional (K_p) dengan masukannya. Gambar berikut menunjukkan blok diagram kontroler ini [8, 11].



Gambar 6.6 Blok Diagram Kontroler Proporsional

Gambar 6.6 di atas bisa ditulis dalam persamaan Laplace:

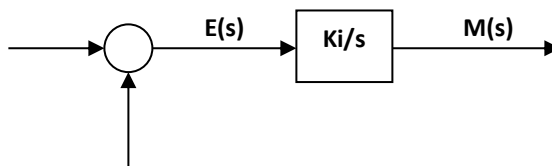
$$M(s) = K_p E(s) \quad (2.56)$$

Ciri-ciri kontroler proporsional harus diperhatikan saat hendak diterapkan pada suatu sistem dengan ketentuan-ketentuan sebagai berikut [8].

1. Jika nilai K_p kecil, kontroler proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga menghasilkan respons yang lambat.
2. Jika nilai K_p dinaikkan, respons sistem menunjukkan semakin cepat mencapai keadaan mantapnya.
3. Jika nilai K_p diperbesar berlebihan, maka akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil atau respons sistem akan berosilasi.

Kontroler Integral

Fungsi dari kontroler integral ialah menghasilkan respons sistem dengan *error steady state* nol. Kontroler ini memiliki karakteristik seperti sebuah integral dan keluarannya sangat dipengaruhi perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan. Keluarannya merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukan. Gambar berikut ini menunjukkan blok diagram antara besaran kesalahan dengan keluaran suatu kontroler integral [8, 11].



Gambar 6.7 Blok Diagram Kontroler Integral

Gambar 6.7 di atas bisa ditulis dalam persamaan Laplace:

$$M(s) = K_i/s \cdot E(s) \quad (2.57)$$

Saat digunakan, kontroler integral memiliki beberapa karakteristik sebagai berikut.

1. Keluaran kontroler memerlukan selang waktu tertentu, sehingga kontroler integral cenderung memperlambat respons.

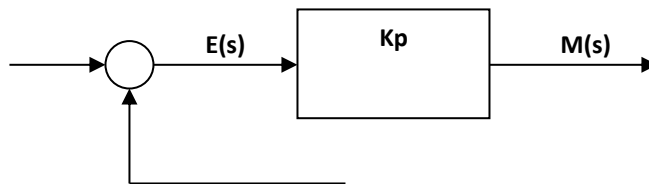
2. Pada saat sinyal kesalahan berharga nol, keluaran kontroler akan bertahan di nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan akibat pengaruh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i bernilai kecil.
4. Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya *offset*. Namun semakin besar nilai konstanta K_i maka akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran kontroler.

Kontroler Proporsional dan Integral

Aksi kontroler PI didefinisikan dengan persamaan sebagai berikut.

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2.58)$$

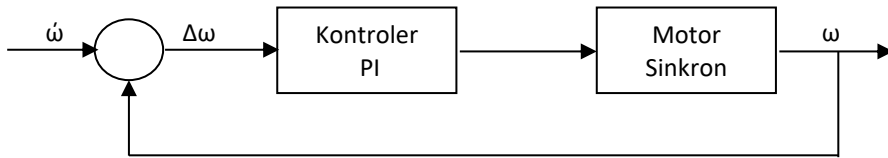
Blok diagram dari persamaan tersebut dapat dilihat pada gambar berikut ini.



Gambar 6.8 Blok Diagram Kontroler Proporsional-Integral

Setiap kekurangan dan kelebihan masing-masing kontroler P dan I akan saling menutupi dengan menggabungkan keduanya secara paralel menjadi kontroler PI.

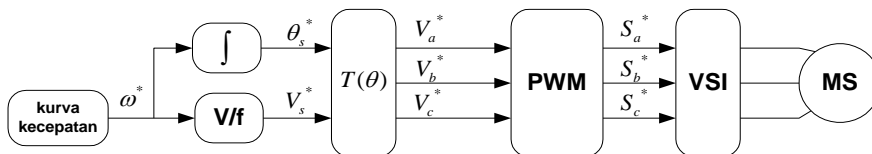
Prinsip utama dari kontroler PI ialah fungsinya yang mempercepat *overshoot* pada sistem, sementara Kontroler I berfungsi menghilangkan kesalahan keadaan tunak atau mempercepat keadaan mantap dari sistem. Sederhananya, blok diagram untuk kontroler PI dapat dilihat pada gambar berikut [15].



Gambar 6.9 Blok Diagram Kontroler PI untuk Pengaturan Kecepatan Motor Sinkron

Kontrol Kecepatan Motor Sinkron dengan Metode Volt/Hertz

Metode pengontrolan ini merupakan yang paling sering digunakan untuk aplikasi kecepatan sederhana seperti kipas angin dan pompa. Menjalankan motor sinkron dengan kontrol *volt/hertz* merupakan bentuk kontrol *loop* terbuka tanpa bantuan sensor (seperti kontrol V/f pada motor induksi). Metode ini menjaga agar rasio keluaran frekuensi dengan keluaran tegangan tetap konstan, sehingga fluks yang konstan dari mesin dapat kita peroleh. Skema dari metode ini dapat dilihat pada gambar berikut [2, 3].



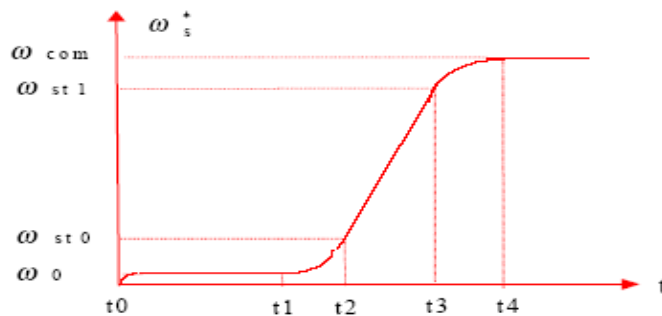
Gambar 6.10 Skema Kontrol Volt/Hertz Konstan

Gambar di atas menunjukkan, bahwa diagram blok suatu model control *volt/hertz* konstan jika “kurva referensi kecepatan” dan perbandingan *volt/hertz* adalah konstan untuk menghasilkan frekuensi referensi ω^* dan tegangan referensi V^* . $T(\theta)$ dalam Gambar menandakan adanya koordinat transformasi dari referensi acuan *stasioner* sinkron. Persamaan (2.59) dan (2.60) digunakan untuk memperoleh tegangan referensi stator didasarkan pada ω^* dan V^* [2].

$$V_a^* = V_s^* \sin \theta_s^* \quad (2.59)$$

$$\theta_s^* = \int_0^t \omega_s^*(\tau) d\tau \quad (2.60)$$

Gate signal PWM Sa, Sb, dan Sc pada *inverter* diperoleh dari referensi tegangan V^*_{abc} melalui perbandingan Sin- Δ . Tipe “kurva referensi kecepatan” dari *starting* motor sinkron dapat dilihat pada gambar di bawah ini, bahwa *starting* secara lengkap terdiri dari interval-interval sebagai berikut:

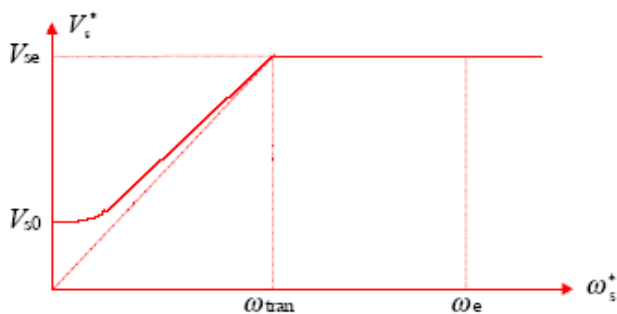


Gambar 6.11 Kurva Referensi Kecepatan

- (t_0, t_1) – interval *kick-off*. Pada awal, *kick-off* ada di nilai beberapa hertz untuk interval yang agak pendek sehingga menghentikan jalannya motor sinkron dari kondisi *stalled*.
- (t_2, t_3) – interval percepatan. Perubahan percepatan adalah mungkin pada percepatan tetap. Arus lebih dan hasil yang tidak stabil jika *rate* percepatan terlalu tinggi, sehingga percepatan yang diinginkan sering diperoleh dari *try and error*.
- (t_1, t_2) dan (t_3, t_4) – interval transisi. Kejelasan dari sudut transisi hasil kurva kecepatan referensi pada arus lebih dan kehilangan sinkronisasi, sehingga transisi yang halus dari gambar sangat dibutuhkan.

Kontrol *volt/hertz* (V/f) konstan juga membutuhkan penaik tegangan pada kecepatan rendah dan fluks *weakening* (fluks bocor) pada kecepatan tinggi. Gambar di bawah ini menunjukkan, bahwa profil

tegangan sebagai fungsi dari frekuensi operasi, di mana V_{se} adalah *rated* tegangan, V_{s0} adalah tegangan yang dinaikkan dari kecepatan nol dan ω_e adalah *rated* kecepatan. Pada saat nilai kecepatan adalah ω_{tan} , motor sinkron harus dioperasikan pada daerah fluks *weakening* (fluks bocor). Sudut dari fluks *weakening* harus diatur demi menjaga kestabilan sistem. Hal ini sangat penting dilakukan pada kurva *volt/hertz*. Dengan bertambahnya beban, V_{s0} akan mengalami kenaikan sedangkan ω_{tan} mengalami penurunan.

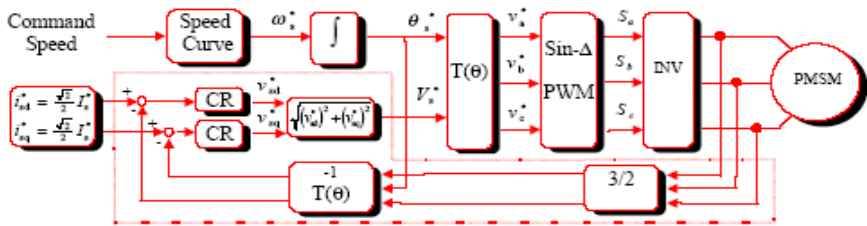


Gambar 6.12 Kurva Fungsi Volt/Hertz Konstan

Pada intinya, performansi dari kontrol *volt/hertz* bergantung pada pemilihan kurva kecepatan referensi dan *setting* dari *volt/hertz*. Motor sinkron tidak pernah berfungsi atau kehilangan sinkronisasi akibat kesalahan *setting* V/f. Waktu dari pendekatan *try and error* dan besarnya kelebihan arus dibutuhkan agar kontrol *volt/hertz* dapat menjalankan motor sinkron pada kecepatan yang sangat tinggi.

Kontroler Kecepatan Motor Sinkron dengan Sensor Arus

Dalam rangka mengurangi arus *starting* yang sangat besar kira-kira 5 sampai 8 kali dari arus *rated*, kita dapat melakukan model kontrol sensor arus seperti gambar berikut [2].



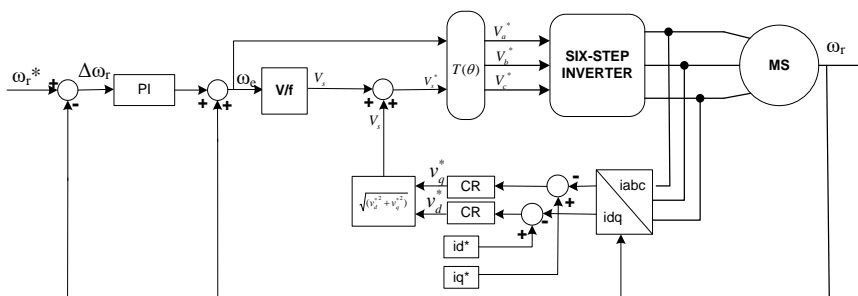
Gambar 6.13 Model Kontrol Kecepatan Sensor Arus

Model sensor arus membangkitkan tegangan melalui regulator arus (digambarkan dengan garis putus-putus). Sensor arus dibutuhkan pada model ini dan pemilihan level arus I_s^* secara empiris bergantung pada beban dan inersia dari sistem, sementara 10% dari arus *rated* akan mampu untuk *pick-off* dan percepatan berikutnya. Melalui pengaturan kontrol PI yang benar, nampaknya kondisi ini akan dapat cukup mengatur arus.

Dibandingkan dengan model *volt/hertz*, model sensor arus selalu stabil. Selain itu, performansi arus yang dihasilkan juga lebih baik meskipun motor sinkron dalam kondisi kehilangan sinkronisasi.

Pengaturan Kecepatan Motor Sinkron dengan *Hybrid Volt* Desain Sistem

Blok diagram dari pengaturan kecepatan motor sinkron bermetode *Hybrid Volt/hertz current* dapat dipelajari pada gambar berikut.



Gambar 6.14 Blok Diagram Pengaturan Kecepatan Motor Sinkron

Bermetode *Hybrid Volt/Hertz-Current*

Sebelum mendesain model simulasi, ada batasan-batasan yang perlu diperhatikan. Pertama, *plant* yang digunakan adalah motor sinkron tiga fasa. Kedua, input utama pada simulasi motor sinkron adalah kecepatan sudut referensi dalam rad/s, tegangan eksitasi pada kumparan medan dan torka mekanik pada rotor. Ketiga, *inverter* yang digunakan adalah *voltage source inverter* (VSI) enam langkah. Dan keempat, keseluruhan proses yang dilakukan dalam simulasi.

Ada tiga langkah utama yang dilakukan dalam perencanaan simulasi secara garis besar. Pertama adalah membuat skema dari sistem. Kedua adalah membuat model simulasi berdasarkan model matematik dan parameter-parameter motor sinkron. Dan ketiga adalah mendapatkan respons *close loop* dari *plant* pada beban tetap dengan kecepatan berubah-ubah.

Model Motor Sinkron

Tegangan abc pada kumparan stator ditransformasikan ke *dqn* menggunakan acuan rotor. Meskipun sudut rotor $\theta_r(t)$ bertambah dengan waktu, $\cos \theta_r(t)$ dan $\sin \theta_r(t)$ tetap dibatasi. Dalam simulasi ini, nilai $\cos \theta_r(t)$ dan $\sin \theta_r(t)$ dapat ditentukan dari variabel frekuensi osilasi rangkaian dengan syarat dari *setting* nilai awal θ_r harus tetap. Transformasi dari *abc* ke *dq* rotor boleh dibuat satu langkah atau terpisah dua langkah. Pada dua langkah, lanjutan keluaran dari langkah pertama tegangan rotor dalam kerangka *dq* referensi tetap, yang mana [5, 9]:

$$v_q^s = \frac{2}{3}v_a - \frac{1}{3}v_b - \frac{1}{3}v_c \quad (3.1)$$

$$v_d^s = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_c - v_b) \quad (3.2)$$

$$v_o = \frac{1}{3}(v_a + v_b + v_c) \quad (3.3)$$

Hasil langkah kedua adalah sebagai berikut:

$$v_q = v_q^s \cos \theta_r(t) - v_d^s \sin \theta_r(t) \quad (3.4)$$

$$v_d = v_q^s \sin \theta_r(t) + v_d^s \cos \theta_r(t) \quad (3.5)$$

dengan,

$$\theta_r = \int_0^t \omega_r(t) dt + \theta_r(0) \quad (3.6)$$

Sebagai alternatif, transformasi dapat dibentuk dalam satu langkah:

$$v_q = \frac{2}{3} \left\{ v_a \cos \theta_r(t) + v_b \cos\left(\theta_r(t) - \frac{2\pi}{3}\right) + v_c \cos\left(\theta_r(t) - \frac{4\pi}{3}\right) \right\} \quad (3.7)$$

$$v_d = \frac{2}{3} \left\{ v_a \sin \theta_r(t) + v_b \sin\left(\theta_r(t) - \frac{2\pi}{3}\right) + v_c \sin\left(\theta_r(t) - \frac{4\pi}{3}\right) \right\} \quad (3.8)$$

$$v_o = \frac{1}{3} (v_a + v_b + v_c) \quad (3.9)$$

Pada sebuah mesin satu kumparan medan pada sumbu- q dan sebuah pasangan kumparan *dampers* dalam sumbu- d dan q , integral persamaan dari fluks *linkage* kumparan adalah sebagai berikut [5, 12]:

$$\psi_q = \omega_b \int \left\{ v_q - \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_d + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{mq} - \psi_q) \right\} dt \quad (3.10)$$

$$\psi_d = \omega_b \int \left\{ v_d + \frac{\omega_r}{\omega_b} \psi_q + \frac{r_s}{x_{ls}} (\psi_{md} - \psi_d) \right\} dt \quad (3.11)$$

$$\psi_0 = \omega_b \int \left\{ v_0 - \frac{r_s}{x_{ls}} \psi_0 \right\} dt \quad (3.12)$$

$$\dot{\psi}_{kq} = \frac{\omega_b r_{kq}}{x_{lkq}} \int (\psi_{mq} - \psi_{kq}) dt \quad (3.13)$$

$$\dot{\psi}_{kd} = \frac{\omega_b r_{kd}}{x_{lkd}} \int (\psi_{md} - \psi_{kd}) dt \quad (3.14)$$

$$\dot{\psi}_f = \frac{\omega_b r_f}{x_{md}} \int \left\{ E_f + \frac{x_{md}}{x_{lf}} (\psi_{mq} - \psi_{kq}) \right\} dt \quad (3.15)$$

dengan,

$$\psi_{mq} = \omega_b L_{mq} (i_q + \dot{i}_{kq}) \quad (3.16)$$

$$\psi_{md} = \omega_b L_{md} (i_d + \dot{i}_{kq} + \dot{i}_f) \quad (3.17)$$

$$E_f = x_{md} \frac{\dot{v}_f}{r_f} \quad (3.18)$$

$$\psi_q = x_{ls} i_q + \psi_{mq} \quad (3.19)$$

$$\psi_d = x_{ls} i_d + \psi_{md} \quad (3.20)$$

$$\psi_0 = x_{ls} i_0 \quad (3.21)$$

$$\dot{\psi}_f = x_{lf} \dot{i}_f + \dot{\psi}_{md} \quad (3.22)$$

$$\dot{\psi}_{kd} = x_{lkd} \dot{i}_{kd} + \dot{\psi}_{md} \quad (3.23)$$

$$\dot{\psi}_{kq} = x_{lkq} \dot{i}_{kq} + \dot{\psi}_{mq} \quad (3.24)$$

Pada persamaan motor, arus i_q dan i_d polaritasnya **positif** pada terminal tegangan kumparan stator. Fluks *linkage* bersama dalam hubungan total fluks *linkage* pada kumparan adalah sebagai berikut.

$$\Psi_{mq} = x_{MQ} \left(\frac{\Psi_q}{x_{ls}} + \frac{\Psi'_{kq}}{x'_{lkq}} \right) \quad (3.25)$$

$$\Psi_{md} = x_{Md} \left(\frac{\Psi_d}{x_{ls}} + \frac{\Psi'_{kd}}{x'_{lkd}} + \frac{\Psi'_f}{x'_{lf}} \right) \quad (3.26)$$

keterangan:

$$\frac{1}{x_{MQ}} = \frac{1}{x_{mq}} + \frac{1}{x'_{lkq}} + \frac{1}{x_{ls}} \quad (3.27)$$

$$\frac{1}{x_{MD}} = \frac{1}{x_{md}} + \frac{1}{x'_{lkd}} + \frac{1}{x'_{lf}} + \frac{1}{x_{ls}} \quad (3.28)$$

Setelah diperoleh nilai fluks *linkange* pada kumparan, maka arus pada sumbu *d* dan *q* dapat dicari menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$i_q = \frac{\Psi_q - \Psi_{mq}}{x_{ls}} \quad (3.29)$$

$$i_d = \frac{\Psi_d - \Psi_{md}}{x_{ls}} \quad (3.29)$$

$$i'_{kd} = \frac{\Psi'_{kd} - \Psi_{md}}{x'_{lkd}} \quad (3.30)$$

$$i'_{kq} = \frac{\Psi'_{kq} - \Psi_{mq}}{x'_{lkq}} \quad (3.31)$$

$$i'_f = \frac{\Psi'_f - \Psi_{md}}{x'_{lf}} \quad (3.32)$$

Arus *dq* kumparan stator ditransformasikan balik ke arus kumparan *abc* dengan acuan rotor dan transformasi *dq0* ke *abc*, sebagai berikut.

$$i_q^s = i_q \cos \theta_r(t) - i_d \sin \theta_r(t) \quad (3.33)$$

$$i_d^s = -i_q \sin \theta_r(t) + i_d \cos \theta_r(t) \quad (3.34)$$

$$i_a = i_q^s + i_0 \quad (3.35)$$

$$i_b = -\frac{1}{2} i_q^s - \frac{1}{\sqrt{3}} i_d^s + i_0 \quad (3.36)$$

$$i_c = -\frac{1}{2} i_q^s + \frac{1}{\sqrt{3}} i_d^s + i_0 \quad (3.37)$$

- **Torka Elektromekanik**

Torka elektromekanik yang dihasilkan oleh motor sinkron dengan p kutub yang didefinisikan menggunakan persamaan (3.38) berikut.

$$\begin{aligned} T_{me} &= \frac{P_{em}}{\omega_{rm}} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \\ &= \frac{3}{2} \frac{P}{2 \omega_b} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \end{aligned} \quad (3.38)$$

Nilai T_{em} adalah positif pada operasi motor sinkron.

- **Persamaan Putaran Rotor**

Pada motor sinkron akselerasi torka, $T_{em} + T_{mec} - T_{damp}$, adalah dalam keadaan rotor berputar. T_{em} dihasilkan oleh motor sinkron adalah positif dan T_{mec} untuk motor negatif. Persamaan torka inersia adalah sebagai berikut.

$$T_{em} + T_{mec} - T_{damp} = J \frac{d\omega_{rm}(t)}{dt} = \frac{2J}{P} \frac{d\omega_{rm}(t)}{dt} \quad (3.39)$$

Sudut rotor δ didefinisikan sebagai sudut pada sumbu- q_r dari rotor dengan respek sumbu- q_e pada putaran sinkron referensi acuan, yang mana:

$$\delta(t) = \theta_r(t) - \theta_e(t) \quad (3.40)$$

$$\delta(t) = \int_0^t (\omega_r(t) - \omega_e) dt + \theta_r(0) - \theta_e(0) \quad (3.41)$$

karena ω_e adalah konstan,

$$\frac{d(\omega_r(t) - \omega_e)}{dt} = \frac{d\omega_r(t)}{dt} \quad (3.42)$$

maka,

$$\omega_r(t) - \omega_e = \frac{P}{2J} \int_0^t (T_{em} + T_{mec} - T_{damp}) dt \quad (3.43)$$

Model Pengaturan Kecepatan Bermetode *Hybrid Volt/Hertz-Current*

- **Model Volt per Hertz**

Sebuah *look-up* tabel digunakan untuk membuat karakteristik *volt/hertz* yang diinginkan. Performansi transien terbaik dapat ditentukan dengan nilai puncak dari tegangan rms dan frekuensi operasi berdasarkan persamaan berikut [5, 12].

$$E_{mb} = (x_d - x_q) I_{ds} + x_{md} I_{fd} \quad (3.44)$$

$$E_m = \frac{E_{mb}}{\omega_b} \omega_e \quad (3.45)$$

$$Z_s = r_s + j \frac{\omega_e}{\omega_b} x_q \quad (3.46)$$

$$V = |E_m + I_{rated} Z_s| \quad (3.47)$$

$$f = \frac{\omega_e}{2\pi} \quad (3.48)$$

- **Model Sensor Arus**

Model sensor arus membangkitkan tegangan melalui regulator arus. Sensor arus diperlukan pada model ini dan pemilihan level arus I_s^* secara empiris bergantung pada beban dan inersia dari sistem [2].

Transformasi ke dalam referensi dq dilakukan untuk mempermudah analisis di mana dari sistem tiga fasa diubah ke dalam sistem dua fasa. Transformasi dari i_{abc} ke dalam i_{dq} menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$i_d = \frac{2}{3} \left[i_a \sin(\omega_r t) + i_b \sin\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.49)$$

$$i_q = \frac{2}{3} \left[i_a \cos(\omega_r t) + i_b \cos\left(\omega_r t - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\omega_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.50)$$

Hasil transformasi ini dibandingkan dengan i_d^* dan i_q^* referensi pada regulator arus untuk memperoleh v_d^* dan v_q^* sehingga v_s^* dapat ditentukan sebagai berikut:

$$v_s^* = \sqrt{(v_d^*)^2 + (v_q^*)^2} \quad (3.51)$$

- **Model Inverter Enam Langkah**

Pengontrolan kecepatan motor sinkron *closed loop* menggunakan *voltage source inverter* (VSI) enam langkah. Modifikasi bentuk tegangan keluaran dari sinusoidal enam langkah pada sumber variabel frekuensi dilakukan dengan menambahkan fungsi *sign* setelah tegangan sinusoidal tiga fasa. Nantinya kita akan menghasilkan gelombang *square* yang beda fasanya 120° antara fasa yang satu dengan yang lain [5].

Bentuk gelombang *square* memiliki komponen fundamental dengan besaran V_{rms} pada amplitudonya. Faktor kompensasi $\sqrt{(2/3)}$ juga harus digunakan pada *gain volt/hertz*, sehingga amplitude dari gelombang *square* akan menghasilkan komponen fundamental yang sama seperti tegangan sinusoidal *rated* pada frekuensi *rated*. Perlu dicatat,

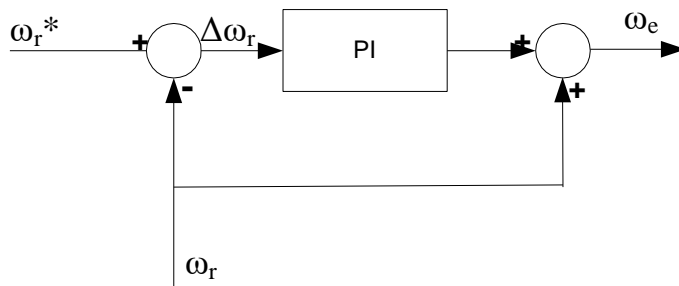
bahwa input *volt/hertz look-up* tabel mengambil secara langsung dari kecepatan referensi.

Model Kontroler

Desain pengaturan kecepatan motor sinkron ini memiliki dua model kontroler yang diterapkan, yaitu kontroler kecepatan dan kontroler arus i_{dq} .

- **Kontroler Kecepatan**

Blok diagram kontroler kecepatan dapat dilihat pada gambar berikut [5].

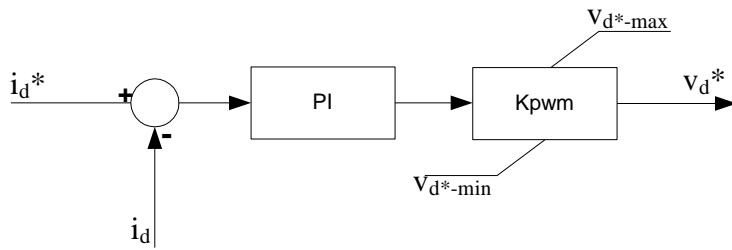


Gambar 6.15 Blok Diagram Kontroler Kecepatan

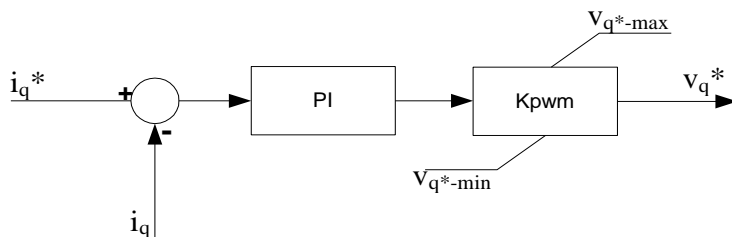
Pada kontrol kecepatan ini, ω_r dibandingkan dengan ω_r^* dan menghasilkan *error* $\Delta\omega$. PI berfungsi untuk menurunkan *over shoot* dan mempercepat kondisi *steady state*. Apabila nilai *error* sama dengan nol, maka ω_r sama dengan ω_e .

- **Kontroler Arus i_{dq}**

Kontroler arus i_{dq} bertujuan untuk memperoleh tegangan v_{dq}^* yakni dengan membandingkan arus i_{dq}^* terhadap i_{dq} acuan rotor. Kontrol PI dan *Kpwm* merupakan *current regulator* yang menghasilkan v_{dq}^* sebagai nilai kompensasi dari keluaran *look-up table volt/hertz*. Blok diagram kontroler arus i_{dq} dapat dilihat pada dua gambar sebagai berikut.



Gambar 6.16 Blok Diagram Kontroler Arus Sumbu d



Gambar 6.17 Blok Diagram Kontroler Arus Sumbu q

Simulasi dan Analisis

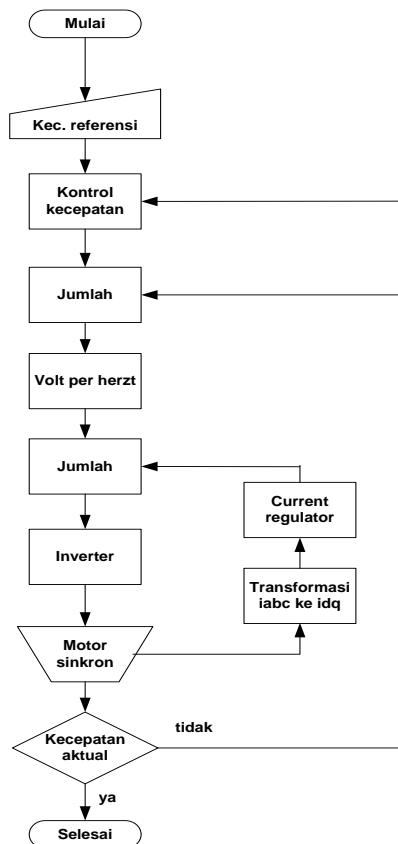
Simulasi program dibuat menggunakan *software* MATLAB versi 7.04. Parameter motor sinkron tiga fasa yang digunakan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 6.1 Parameter Motor Sinkron Tiga Fasa [7]

Parameter Motor Sinkron	
Daya	100 hP
$V_{line-line rms}$	460 volt
Frekuensi	60 Hz
r_s	0,04 pu
x_{md}	1,1 pu
x_{mq}	0,3 pu
x_{ls}	0,1 pu
x'_{ld}	0,1 pu
x'_{lq}	0,15 pu

X'_{if}	0,2 pu
X'_{rf}	0,2 pu
X'_{kd}	0,04
X'_{kq}	0,08
H	0,1 detik
Damper	0

Untuk memperoleh nilai parameter-parameter lain dari motor sinkron digunakan model matematik dari motor sinkron. Langkah-langkah simulasi yang dilakukan untuk mengatur kecepatan motor sinkron, dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 6.18 Diagram Alir Simulasi Motor Sinkron

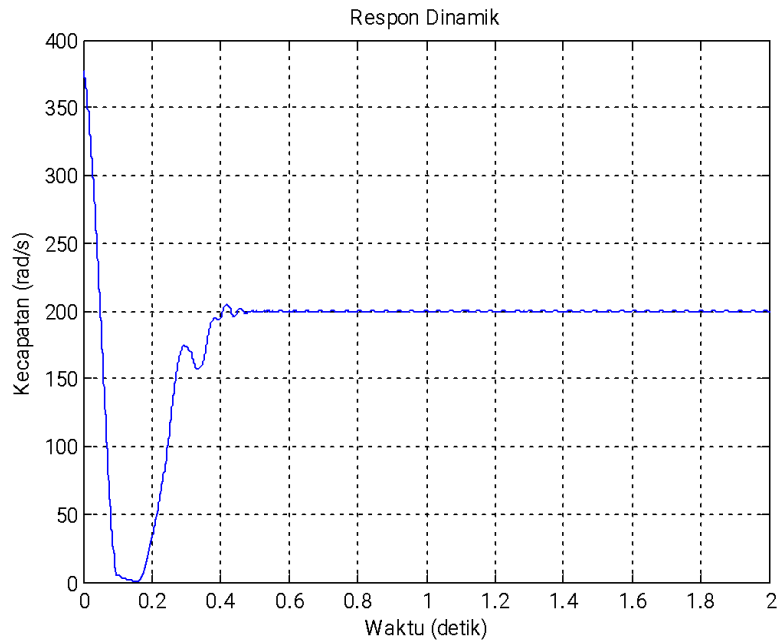
Berikut penjelasan dari diagram alir simulasi di atas:

- Kecepatan diatur dari 200 rad/s sampai 500 rad/s pada beban konstan 1 pu.
- Kontrol kecepatan membaca *error* antara kecepatan aktual dengan kecepatan referensi nilai *error* ini dijumlahkan dengan kecepatan aktual sehingga menghasilkan kecepatan elektromekanik (ω_e).
- ω_e sebagai masukan dari *volt/hertz* untuk menghasilkan tegangan yang sebanding dengan frekuensi sistem agar fluksi dengan kondisi tetap dapat dipertahankan.
- Keluaran *volt/hertz* dengan blok osilator menghasilkan tegangan kotak dari keluaran *inverter* berupa tegangan fasa a v_a , tegangan fasa b v_b dan tegangan fasa c v_c . Tegangan ini diterapkan pada operasi motor sinkron.
- Apabila kecepatan motor sinkron sama dengan kecepatan referensi, maka proses simulasi berakhir, namun juga tidak sama, maka akan diumpungkan ke kontroler kecepatan agar kecepatan referensi sama dengan kecepatan aktual motor.
- Sensor arus yang digunakan sebagai kompensasi pada *volt/hertz* ialah untuk memperbaiki performansi dari arus stator.

Simulasi artinya meniru keadaan yang sebenarnya dari suatu sistem. Kemiripan hasil simulasi dengan sistem yang sebenarnya sangat bergantung pada model matematik. Dalam hal ini penulis menggunakan model matematik motor sinkron, yang diharapkan memiliki kemiripan dinamika dengan *plant* yang sesungguhnya.

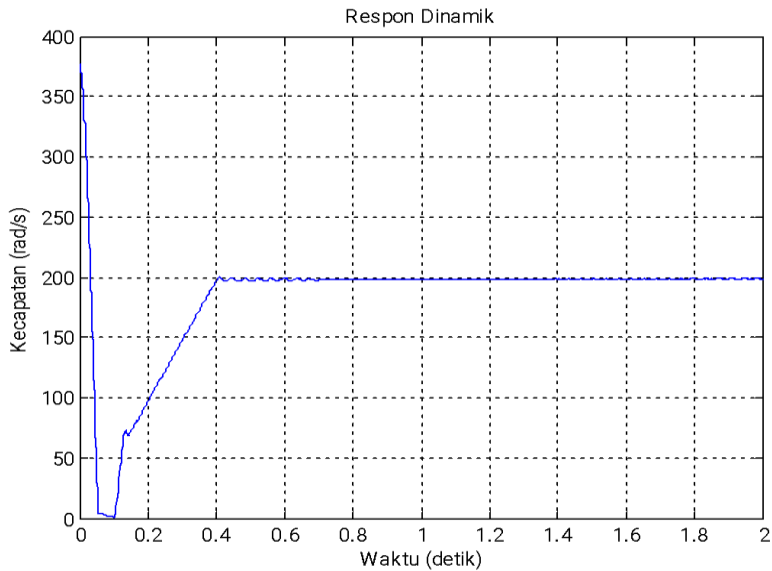
Simulasi dilakukan dengan beban motor tetap, sementara kecepatan referensi dibuat berubah-ubah dari 200 rad/s sampai 500 rad/s dan dibandingkan dengan model *volt/hertz*. Hasil simulasi pengaturan kecepatan motor sinkron dapat dilihat sebagai berikut.

1. *Set point* kecepatan referensi 200 rad/s
 - a. Respons kecepatan
 - Model volt/hertz



Gambar 6.19 Respons Kecepatan Model Volt/Hertz dengan *Set Point* 200 rad/s

- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



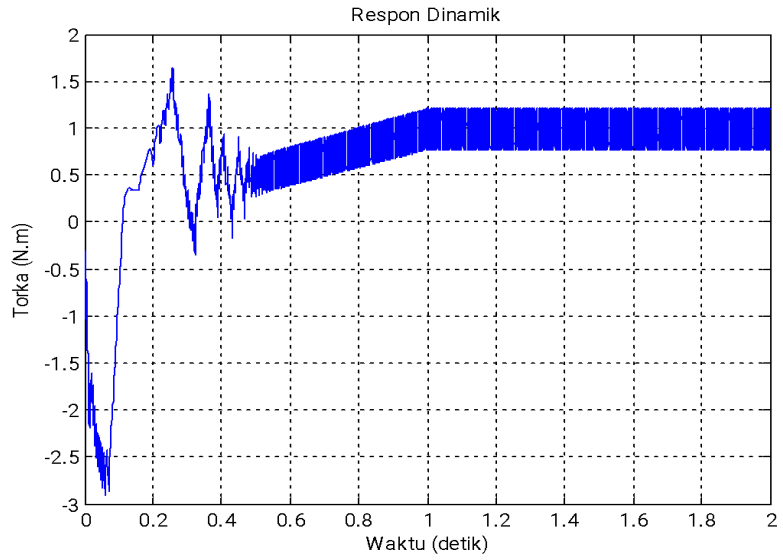
Gambar 6.20 Respons Kecepatan Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 200 rad/s

Tabel 6.2 Parameter Simulasi Kecepatan Motor Sinkron dengan *Set Point* 200 rad/s

Parameter Simulasi	Model Volt/Hertz	Model <i>Hybrid Volt/Hertz-Current</i>
Kecepatan (rad/s)	200	200
Rise time (s)	0,2395	0,2989
Max. overshoot (%)	2,5	0.4
Settling time (s)	0,0912	0,090

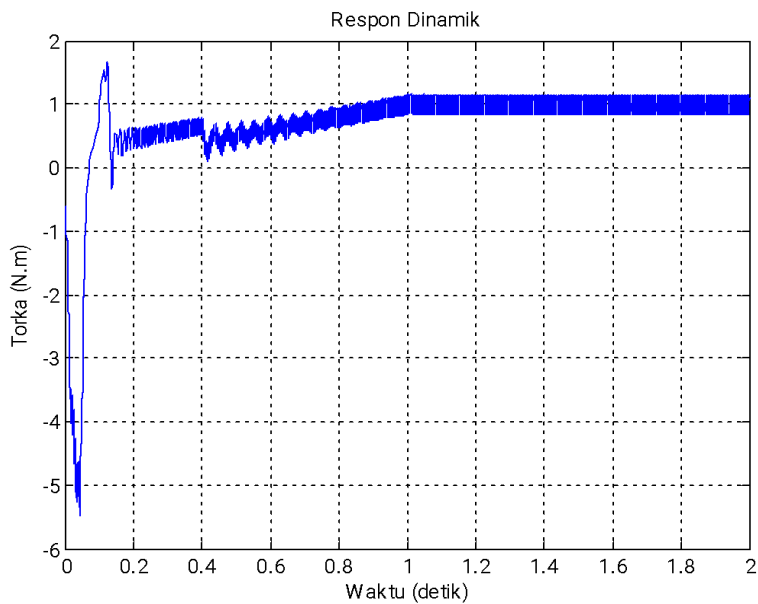
Dari tabel di atas, kita melihat bahwa respons kecepatan dari model *Hybrid Volt/Hertz-Current*, dengan *rise time* 0,2989 s, *maximum overshoot* 0,4 % dan *settling time* 0,090 s, lebih baik dibandingkan model *volt/hertz*, dengan *rise time* 0,2395 s, *maximum overshoot* 2,5 % dan *settling time* 0,0912 s.

- b. Respons torka
- Model volt/hertz



Gambar 6.21 Respons Torka Model Volt/Hertz dengan *Set Point* 200 rad/s

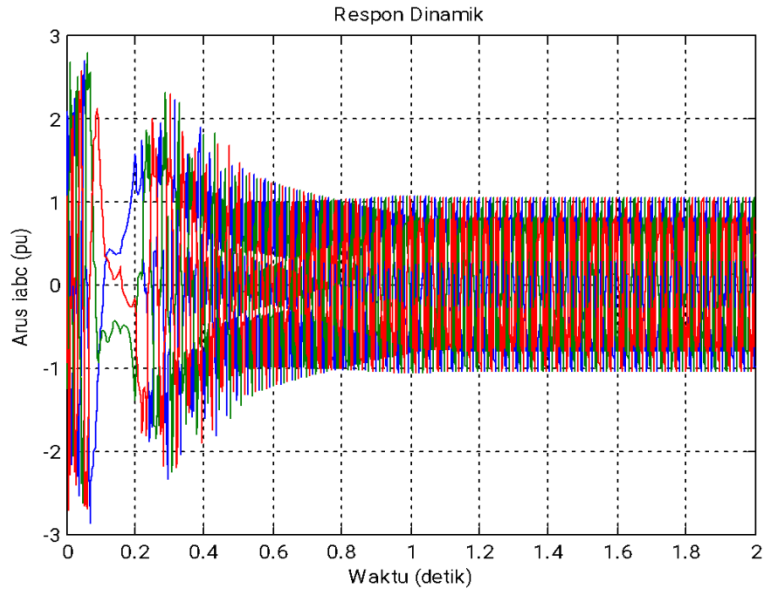
- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



Gambar 6.22 Respons Torka Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 200 rad/s

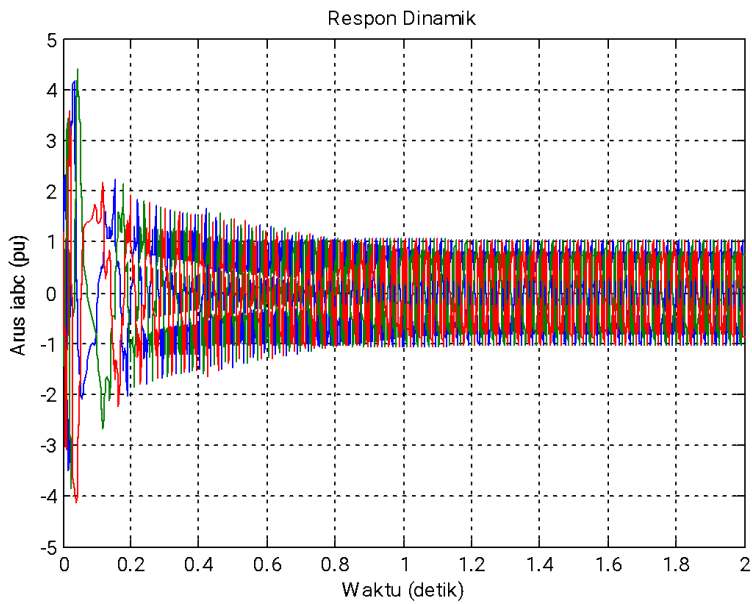
Dari dua gambar di atas kita melihat, bahwa respons torka model *Hybrid Volt/hertz* berosilasi dengan nilai $\pm 1,161$ pu, sedangkan pada model volt/hertz isolasinya adalah 1,216 pu.

- c. Performansi arus
- Model volt/hertz



Gambar 6.23 Performansi Arus Model Volt/Hertz dengan *Set Point* 200 rad/s

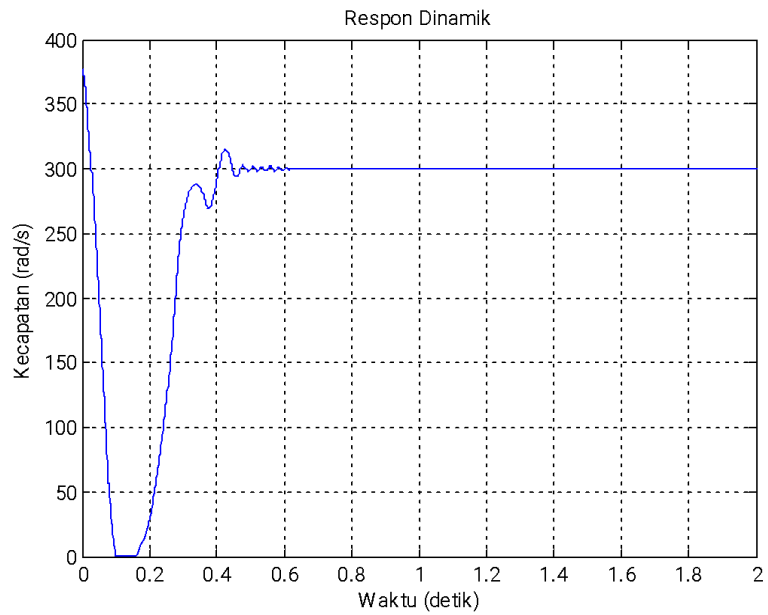
- Model *Hybrid Volt/hertz-current*



Gambar 6.24 Performansi Arus Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 200 rad/s

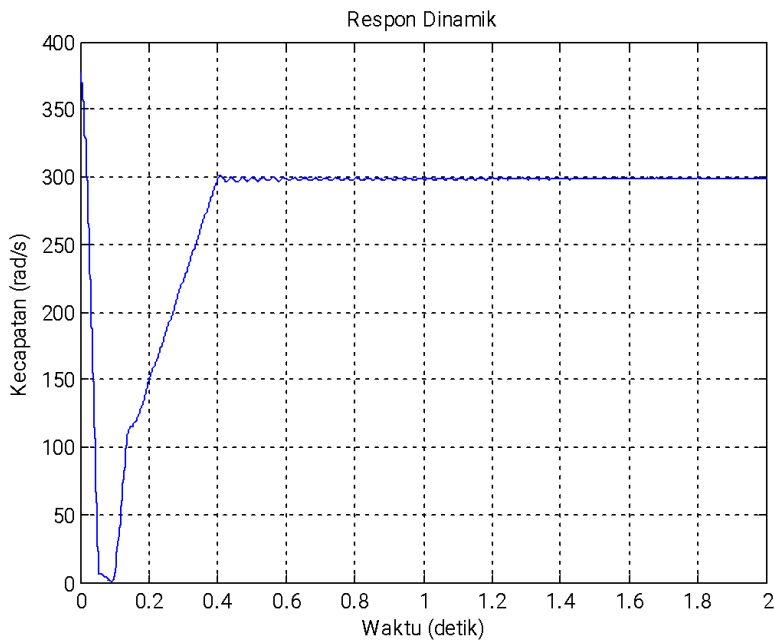
Performansi arus model *Hybrid Volt/hertz* dianggap lebih baik sebab osilasi sebelum *steady state* lebih kecil dibandingkan dengan model volt/hertz.

2. *Set point* kecepatan referensi 300 rad/s
 - a. Respons kecepatan
 - Model volt/hertz



Gambar 6.25 Respons Kecepatan Model Volt/Hz dengan *Set Point* 300 rad/s

- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



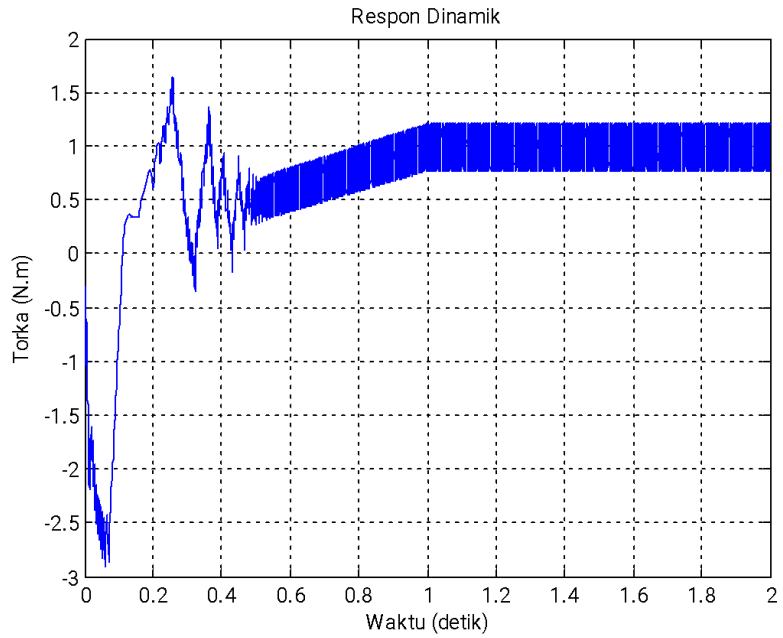
Gambar 6.26 Respons Kecepatan Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 300 rad/s

Tabel 6.3 Parameter Simulasi Kecepatan Motor Sinkron dengan *Set Point* 300 rad/s

Parameter Simulasi	Model Volt/Hertz	Model <i>Hybrid Volt/Hertz-Current</i>
Kecepatan (rad/s)	300	300
Rise time (s)	0,4398	0,2677
Max. overshoot (%)	3,6	0,4
Settling time (s)	0,2	0,1

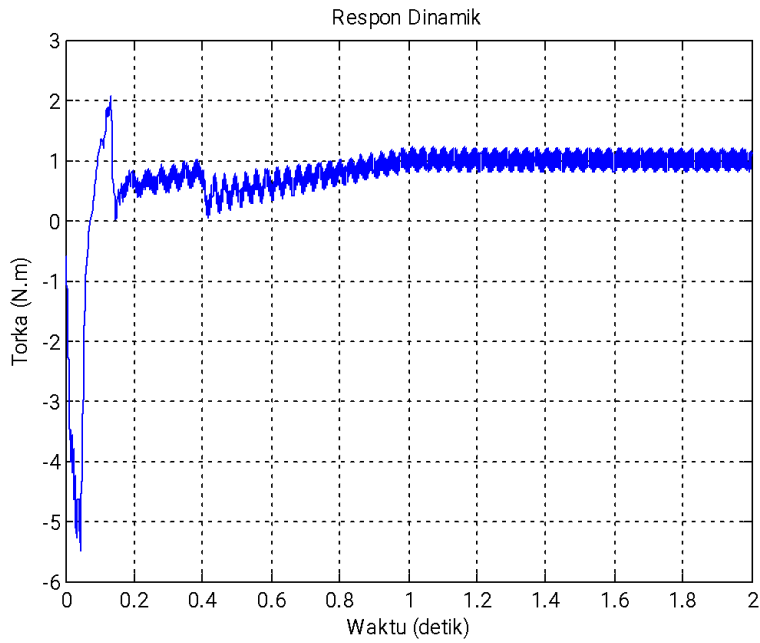
Dari tabel di atas kita melihat, bahwa respons kecepatan dari model *Hybrid Volt/Hertz-Current*, dengan *rise time* 0,2677 s, *maximum overshoot* 0,4 % dan *settling time* 0,1 s lebih baik dibandingkan model *volt/hertz*.

- b. Respons torka
- Model volt/hertz



Gambar 6.27 Respons Torka Model Volt/Hertz dengan *Set Point* 300 rad/s

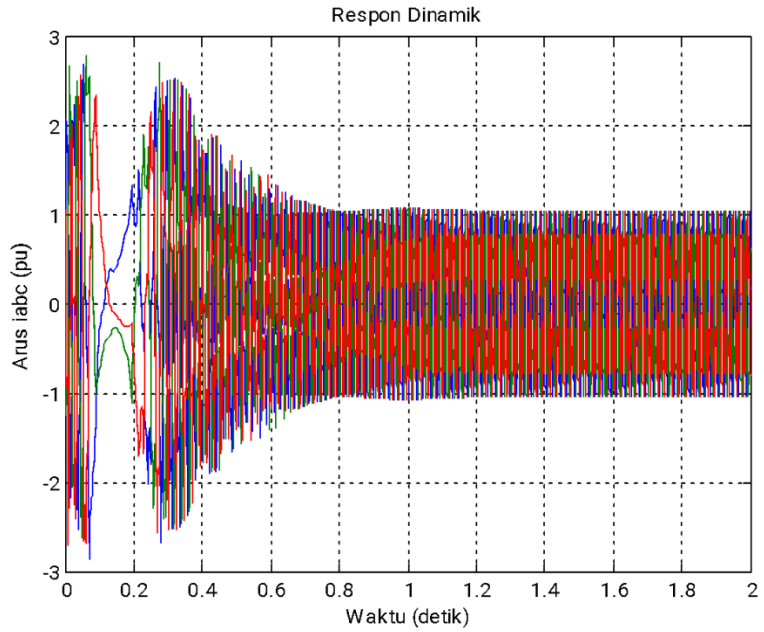
- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



Gambar 6.28 Respons Torka Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 300 rad/s

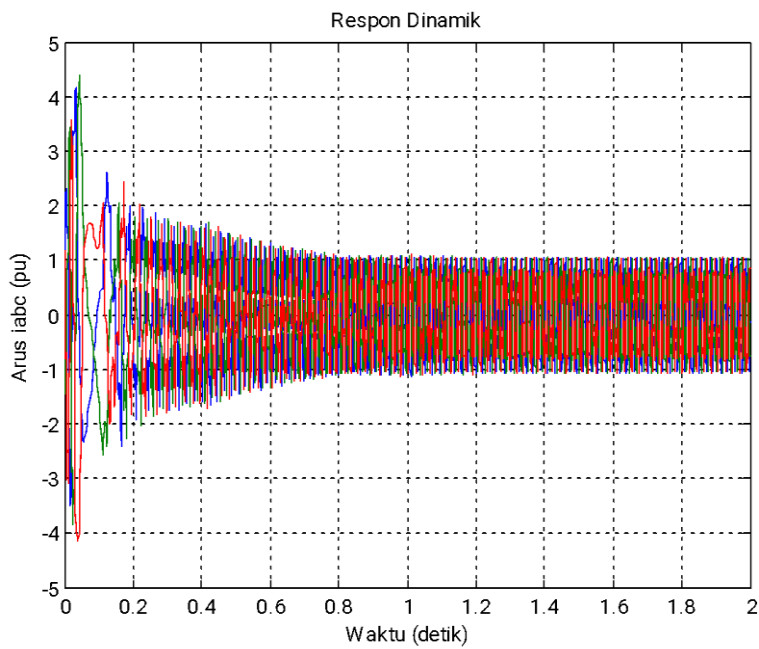
Dari dua gambar di atas, kita melihat bahwa respons torka model *Hybrid Volt/hertz* berosilasi dengan nilai $\pm 1,012$ pu, sedangkan pada model volt/hertz isolasinya adalah $\pm 1,103$ pu.

- a. Performansi arus
- Model volt/hertz



Gambar 6.29 Performansi Arus Model Volt/Hertz dengan *Set Point* 300 rad/s

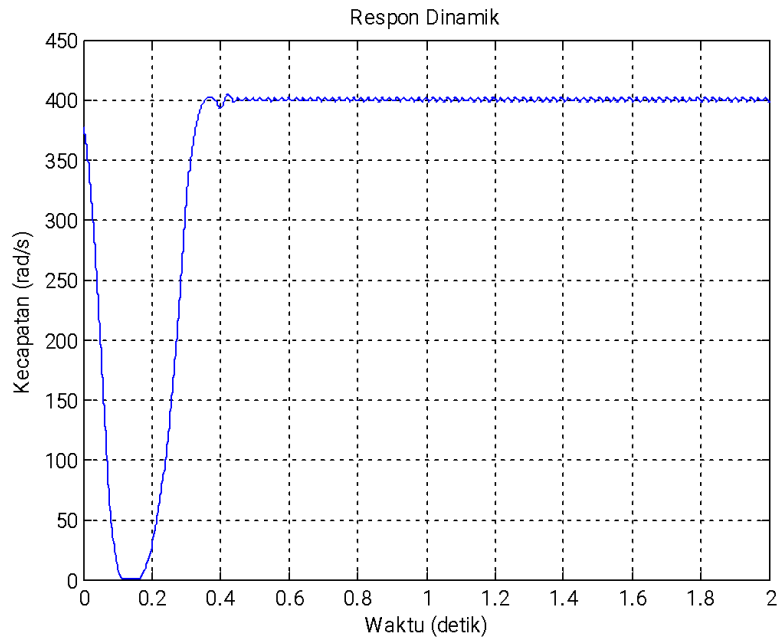
- Model *Hybrid Volt/hertz-current*



Gambar 6.30 Performansi Arus Model Volt/*Hertz-Current* dengan *Set Point* 300 rad/s

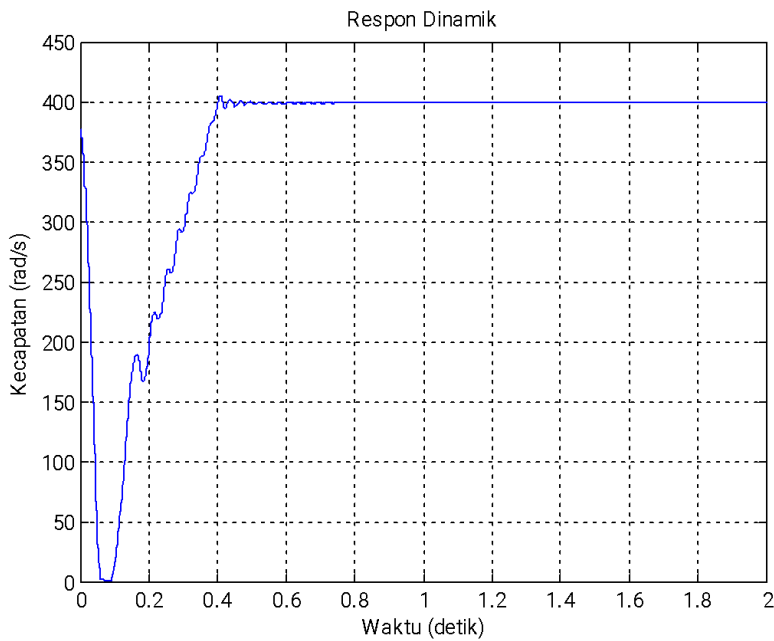
Performansi arus model *Hybrid Volt/hertz* lebih baik sebab osilasi sebelum *steady state* lebih kecil dibandingkan dengan model volt/hertz.

3. *Set point* kecepatan referensi 400 rad/s
 - a. Respons kecepatan
 - Model volt/hertz



Gambar 6.31 Respons Kecepatan Model Volt/Hertz dengan *Set Point* 400 rad/s

- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



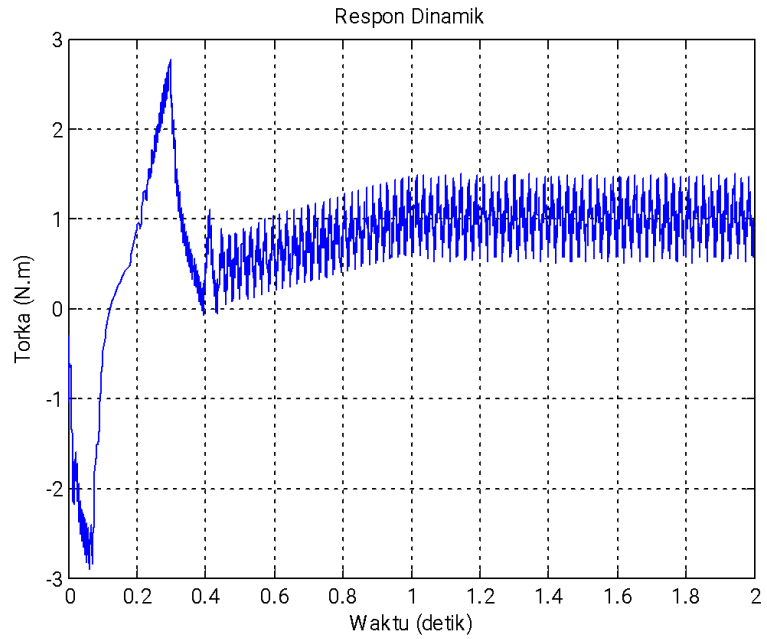
Gambar 6.32 Respons Kecepatan Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 400 rad/s

Tabel 6.4 Parameter Simulasi Kecepatan Motor Sinkron dengan *Set Point* 400 rad/s

Parameter Simulasi	Model Volt/Hertz	Model <i>Hybrid Volt/Hertz-Current</i>
Kecepatan (rad/s)	400	400
Rise time (s)	0,192	0,309
Max. overshoot (%)	1,275	0,975
Settling time (s)	0,0914	0,1307

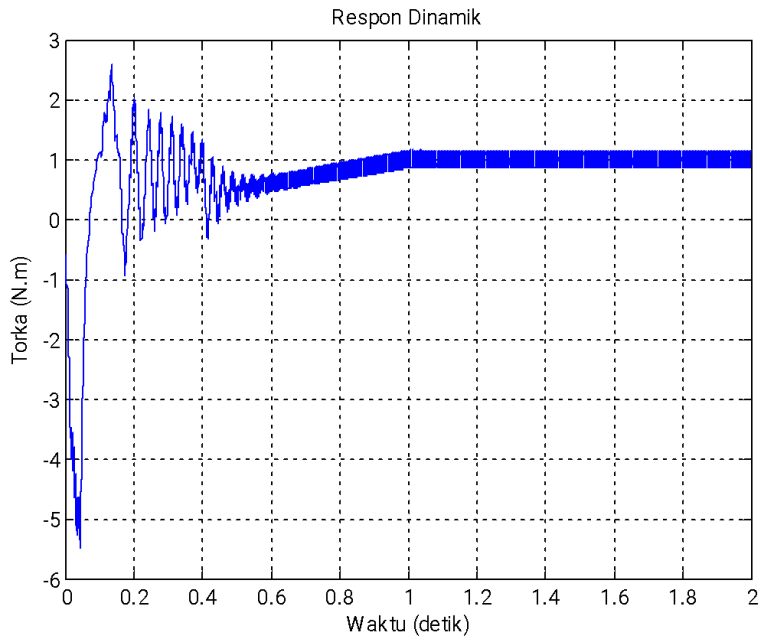
Tabel di atas menunjukkan, bahwa respons kecepatan dari model *Hybrid Volt/Hertz-Current*, dengan *rise time* 0,309 s, *maximum overshoot* 0,975 % dan *settling time* 0,1307 s, *overshoot*-nya lebih dari model *volt/hertz*.

- b. Respons torka
- Model volt/hertz



Gambar 6.33 Respons Torka Model Volt/Hertz dengan *Set Point* 400 rad/s

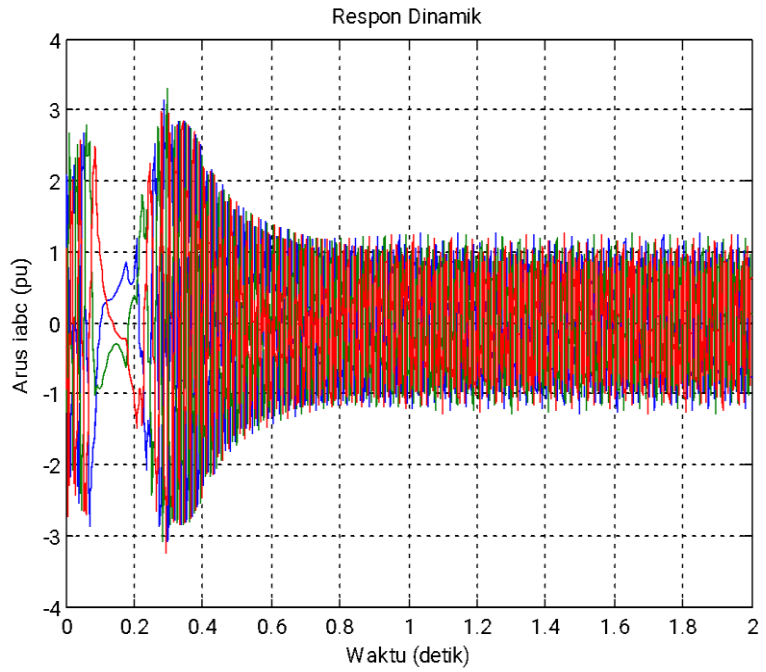
- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



Gambar 6.34 Respons Torque Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 400 rad/s

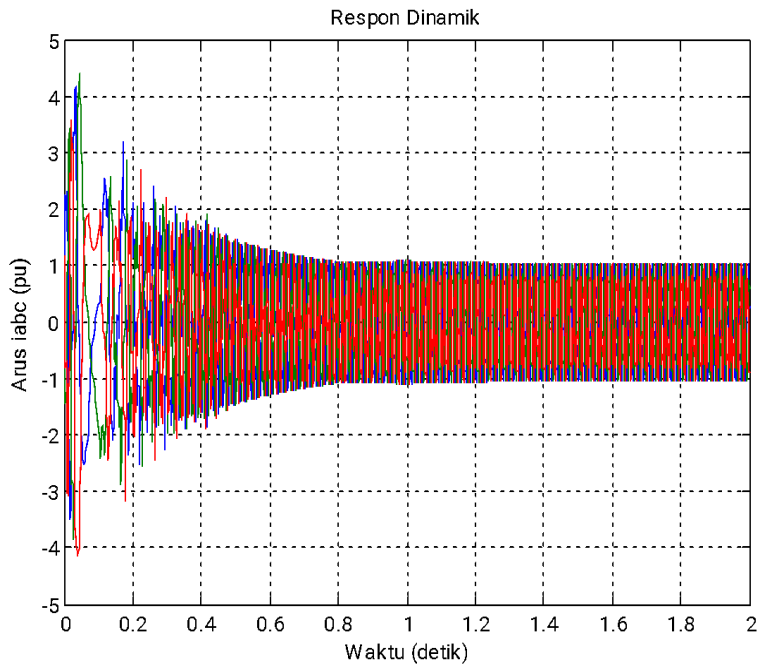
Dua gambar di atas menunjukkan, bahwa respons torque model *Hybrid Volt/hertz* besiolasi dengan nilai $\pm 1,155$ pu, sedangkan pada model volt/hertz isolasinya adalah $\pm 1,48$ pu.

- c. Performansi arus
- Model volt/hertz



Gambar 6.35 Performansi Arus Model Volt/Hertz
dengan *Set Point* 400 rad/s

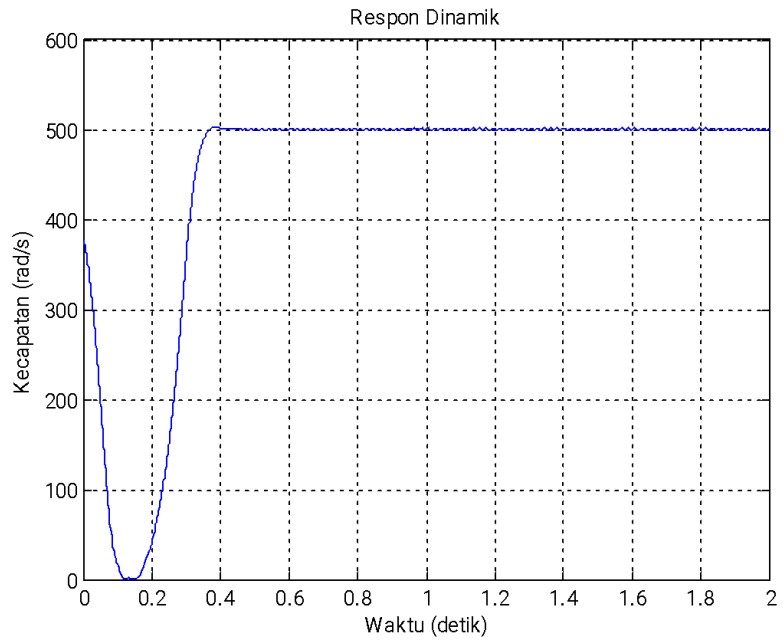
- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



Gambar 6.36 Performansi Arus Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 400 rad/s

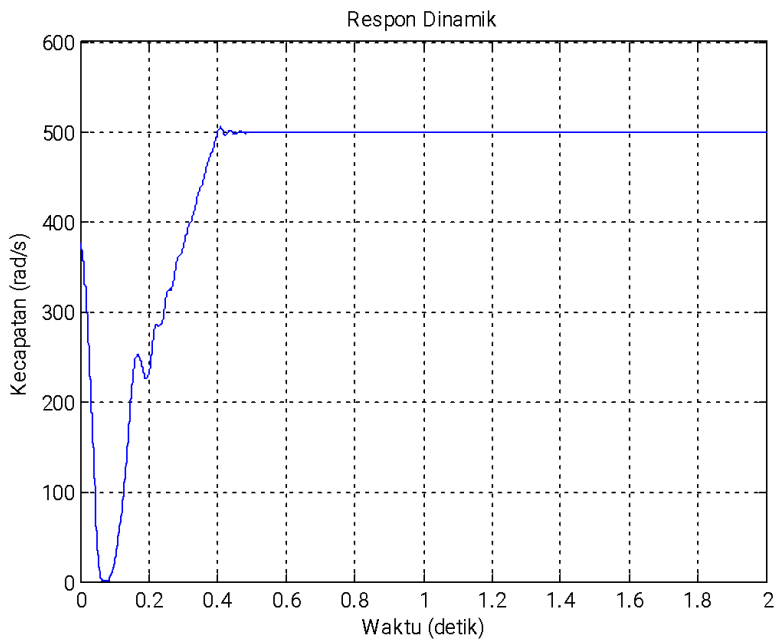
Performansi arus model *Hybrid Volt/hertz* dianggap lebih baik, sebab osilasi sebelum *steady state* lebih kecil dibandingkan dengan model volt/hertz.

4. *Set point* kecepatan 500 rad/s
 - a. Respons kecepatan
 - Model volt/hertz



Gambar 6.37 Respons Torqa Model Volt/Hertz
dengan *Set Point* 500 rad/s

- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



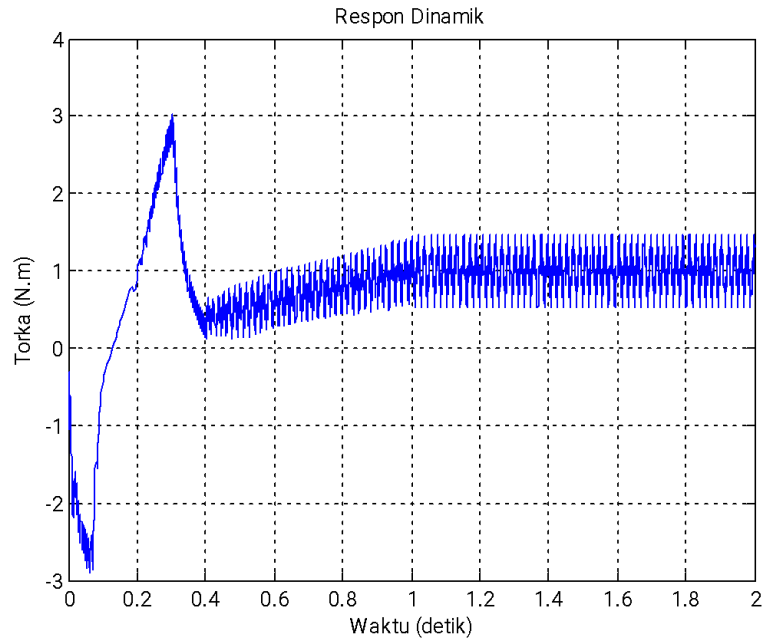
Gambar 6.38 Respons Kecepatan Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 500 rad/s

Tabel 6.5 Parameter Simulasi Kecepatan Motor Sinkron dengan *Set Point* 500 rad/s

Parameter Simulasi	Model Volt/Hertz	Model <i>Hybrid Volt/Hertz-Current</i>
Kecepatan (rad/s)	500	500
Rise time (s)	0,2182	0,316
Max. overshoot (%)	0,6	0,44
Settling time (s)	0,313	0,048

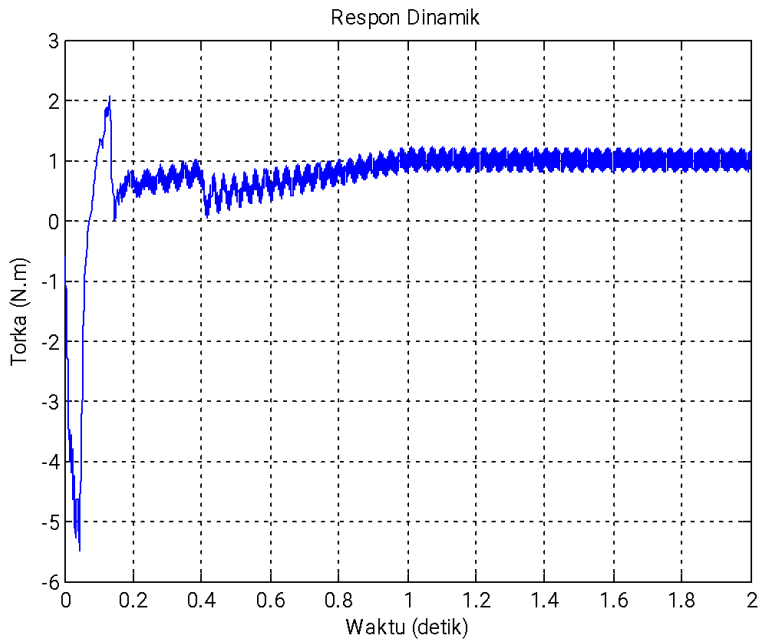
Dari tabel di atas, maka dapat kita simpulkan bahwa respons kecepatan dari model *Hybrid Volt/Hertz-Current*, dengan *rise time* 0,316 pu, *maximum overshoot* 0,44 dan *settling time* 0,048 lebih baik dari model *volt/hertz*.

- b. Respons torka
- Model volt/hertz



Gambar 6.39 Respons Torka Model Volt/Hertz dengan *Set Point* 500 rad/s

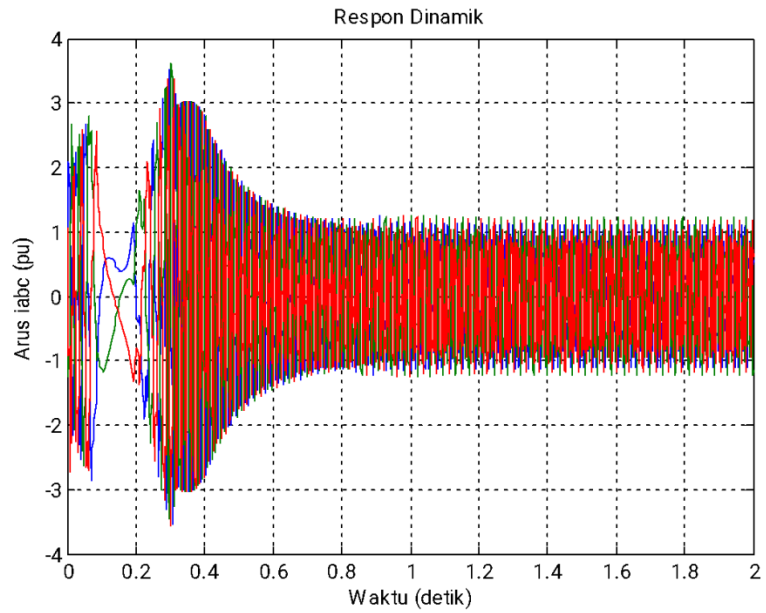
- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



Gambar 6.40 Respons Torka Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 500 rad/s

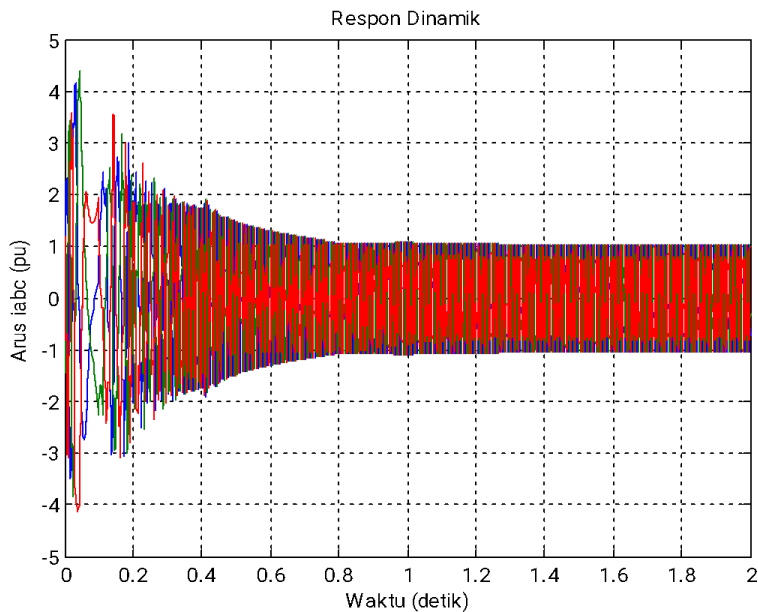
Dua gambar di atas menunjukkan, bahwa respons torka model *Hybrid Volt/hertz* besiolasi dengan nilai ± 1.158 pu, sedangkan pada model volt/hertz isolasinya adalah $\pm 1,464$ pu.

- d. Performansi arus
- Model volt/hertz



Gambar 6.41 Performansi Arus Model Volt/Hertz
dengan *Set Point* 500 rad/s

- Model *Hybrid Volt/Hertz-Current*



Gambar 6.42 Performansi Arus Model *Hybrid Volt/Hertz-Current* dengan *Set Point* 500 rad/s

Performansi arus model *Hybrid Volt/hertz* dianggap lebih baik, sebab osilasi sebelum *steady state* lebih kecil dibandingkan dengan model *volt/hertz*.

Intisari

Pada intinya, respons simulasi pengaturan kecepatan motor sinkron bermetode *Hybrid Volt/hertz current* memiliki nilai *rise time* berkisar 0,2677 pu sampai 0,316 pu, *maximum overshoot* 0,4% sampai 0,975% dan *settling time* 0,048 pu sampai 0,1307 pu. Kondisi ini dianggap lebih baik dari respons kecepatan dari model *vol/hertz* dengan nilai *rise time* 0,192 pu sampai 0,4398 pu, *maximum overshoot* 0,6% sampai 3,6% dan *settling time* 0,093 pu sampai 0,313 pu. Respons torka pada model *Hybrid*

Volt/hertz current sendiri lebih kecil dengan nilai antara $\pm 1,012$ pu sampai $\pm 1,161$ pu dibandingkan dengan model *volt/hertz*. Selain itu, performansi arus dari model *Hybrid Volt/hertz current* lebih baik dibandingkan performansi arus model *volt/hertz*.

Pengaturan kecepatan bermetode *volt/hertz curren* dilakukan menggunakan kontroler PI. Nilai K_p dan K_i dicari dengan metode coba-coba (*try and error*) dan hanya berlaku pada motor yang digunakan di sini, jika motor sinkron dengan parameter yang diterapkan, sehingga K_p dan K_i harus dicari kembali. Untuk mengatasi ini, kita perlu mengembangkan sistem ini dengan kontroler yang lebih handal, misalnya *fuzzy* atau *neural network controller*). Selain itu, respons dari simulasi ini juga masih terlihat berisalisasi sehingga untuk mengatasi masalah tersebut disarankan menggunakan *controller* torka.

Referensi

- [1] A. E. Fitzgerald, "*Mesin-Mesin Listrik*", Edisi Keempat, Erlangga, 1986.
- [2] Aongya Xu, "*Implementation and Expremental Investigation Sensorless Control Scemes for PMSM in Super-High Variable Speed Operation*", IEEE Transactions on Inc, 1998.
- [3] Bimal K. Bose, "*Modern Power Electronics And AC Drive*", Copy Right Printce Hall PTR, 1998.
- [4] Byong-Kuk Lee, Mehrdad Ehsani, "*A Simplified Functional Simulation Model for Three-Phase Voltage-Source Inverter Using Switching Function Concept*", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol 48, no. 2 April 2001.
- [5] Chee Mun Ong, "*Dynamic Simulation Electric Machinery*", Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1998
- [6] Didi Kurniawan, "*Analisis State Space Self Controlled Motor Sinkron dengan Kontrol Margin Angle Konstan*" Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro ITS, Surabaya, 2000
- [7] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "*Vector Control and Dinamics of AC Drives*", Clarendon Press, 1996.

- [8] Indra Pamungkas, *"Perancangan Indirect Field-Oriented Control untuk Mengendalikan Kecepatan dan Torsi pada Motor Sinkron Magnet Permanen Tiga Fasa"*, Tugas Akhir Jurusan Teknik Elektro ITS, 2004.
- [9] Ion Boldea, Syed A. Nasar, *"Vector Control of AC Drive"*, CRC Press Inc, Florida, 1992
- [10] JMD Murphy & FG Turnbull, *"Power Electronic Control of AC Motor"*, Pergamon Press, 1988.
- [11] Katsuhiko Ogata, *"Modern Control Engineering-Fourth Edition"*, Prentice-Hall, Inc, 2002
- [12] Paul C. Krause, *"Analysis of Electric Machinery"* Mc Graw Hill, New York, 1998.
- P.C. Sen, *"Principles of Electric Machines and Power Electronics"* John Wiley & Sons, Inc, 1989
- Ramin Monajemy, *"Control Strategies and Parameter Compensation for Permanent Magnet Synchronous Drives"*, Copyrigh, 2000
- Soebagio, *"Peran Pengemudi Elektris dalam Menghadapi Kompetisi Global"*, Pidato Pengukuhan Guru Besar, ITS, Surabaya, 2003

PENULIS



Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., IPM.
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Makassar
indarcg@gmail.com ; indar@eng.unhas.ac.id



Dr. Eng. Muhammad Abdillah, S.T., M.T.
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Pertamina
Jakarta
Email: m.abdillah@universitaspertamina.ac.id



Ir. Syukriyadin, S.T., M.T., IPM.
Jurusan Teknik Elektro dan Komputer
Universitas Syiah Kuala
Banda Aceh
syukriyadin@usk.ac.id; syukriyadin@gmail.com



Safrizal, S.T., M.T.
Program Studi Teknik Elektro
Universitas Islam Nadhlatul Ulama
Jepara
Safrizal27@unisnu.ac.id



Dr. Firdaus, S.Pd., M.T.
Program Studi Teknik Elektro Universitas Negeri
Makassar
dauselektro@unm.ac.id



Ramly Rasyid, S.T., M.T.
Program Studi Teknik Elektro Unkhair
Ternate
ramlyteknik@gmail.com



Memasuki era modern saat ini, energi listrik menjadi kebutuhan terpenting bagi manusia sehingga keberadaannya harus memadai. Berangkat dari masalah maupun kebutuhan terkait sistem tenaga listrik, buku ini berusaha menjadi jawaban dan juga solusi konkret. Buku ini terdiri dari enam bagian utama yang masing-masing menyajikan solusi atau inovasi tentang bagaimana menjaga eksistensi sumber daya listrik yang memadai, seperti memastikan kestabilan, keamanan, hingga inovasi yang mengadopsi logika berpikir manusia dan *motor drive* khususnya motor sinkron. Buku ini diharapkan menjadi referensi utama untuk menyelesaikan masalah pada sistem tenaga listrik baik secara teoretis maupun praktis di kalangan para *stakeholder* bidang pengadaan sumber daya listrik dan *motor drive*.

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)

Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581

Telp/Fax : (0274) 4533427

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

✉ cs@deepublish.co.id

📍 Penerbit Deepublish

📱 @penerbitbuku_deepublish

🌐 www.penerbitdeepublish.com



Kategori : Teknik Kelistrikan

ISBN 978-623-02-6407-8



9 786230 264078