

**Skema Pelepasan Beban Pada
Sistem Tenaga Listrik Dengan**

**TEKNIK SIMULASI
KESTABILAN
TEGANGAN DOMAIN WAKTU**

Ardiaty Arief, Ph.D.

BUKU REFERENSI

**SKEMA PELEPASAN BEBAN PADA
SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN
TEKNIK SIMULASI KESTABILAN
TEGANGAN DOMAIN WAKTU**

Ardiaty Arief, Ph.D.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113
Undang-undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

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).
3. 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 a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
4. Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp4.000.000.000,00 (empat miliar rupiah).

BUKU REFERENSI

SKEMA PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN TEKNIK SIMULASI KESTABILAN TEGANGAN DOMAIN WAKTU

Ardiaty Arief, Ph.D.



BUKU REFERENSI

SKEMA PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN TEKNIK SIMULASI KESTABILAN TEGANGAN DOMAIN WAKTU

**Diterbitkan pertama kali oleh CV Amerta Media
Hak cipta dilindungi oleh undang-undang *All Rights Reserved*
Hak penerbitan pada Penerbit Amerta Media
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau
seluruh isi buku ini
tanpa seizin tertulis dari Penerbit**

Anggota IKAPI

Cetakan Pertama: Februari 2023

15 cm x 23 cm

ISBN: 978-623-419-250-6

Penulis:

Ardiaty Arief, Ph.D.

Desain Cover:

Dwi Prasetyo

Tata Letak:

Ladifa Nanda

Diterbitkan Oleh:

CV. Amerta Media

NIB. 0220002381476

Jl. Raya Sidakangen, RT 001 RW 003, Kel, Kebanggan,
Kec. Sumbang, Purwokerto, Banyumas 53183, Jawa Tengah.

Telp. 081-356-3333-24

Email: mediaamerta@gmail.com

Website: amertamedia.co.id

Whatsapp : 081-356-3333-24

Isi di luar tanggung jawab penerbit Amerta Media

PRAKATA

Assalamu Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Syukur Alhamdulillah Rabbil 'Alamin. Puji syukur kehadiran ALLAH Subhanahu Wata'ala, yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, atas nikmat dan karunia yang telah banyak diberikan, dan sholawat serta salam untuk junjungan Nabi akhir zaman Muhammad Rasulillah Sallallahu Alaihi Wasallam. Atas izin ALLAH serta hanya atas Rahmat, Hidayah, Inayah dan Ridho ALLAH yang Maha Pengasih dan Maha Penyayang, penulis dapat menyelesaikan buku Referensi "Skema Pelepasan Beban pada Sistem Tenaga Listrik dengan Teknik Simulasi Kestabilan Tegangan Domain Waktu". Buku Referensi ini merupakan salah satu wujud tulisan yang berisi paparan teori, konsep dan hasil penelitian terkait pelepasan beban dalam sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan tegangan sistem tenaga listrik berbasis simulasi domain waktu.

Harapan penulis buku referensi ini dapat digunakan sebagai acuan dan tambahan ilmu pengetahuan bagi mahasiswa S1, S2 maupun S3, pengajar, peneliti sistem tenaga, perencana/insinyur sistem tenaga ataupun pihak lain yang berminat mempelajari atau meneliti terkait pelepasan beban listrik. Penulis berharap buku referensi ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan ke depan.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Makassar, Februari 2023

ABSTRAK

Penelitian ini mengusulkan desain dan implementasi metode baru untuk skema pelepasan beban akibat penurunan tegangan atau *under-voltage load shedding (UVLS)*. Skema pelepasan beban akibat penurunan tegangan ini dilakukan berdasarkan teknik simulasi domain waktu dinamis untuk menghindari penurunan tegangan pada sistem tenaga. Metode yang dikembangkan dapat digunakan untuk menentukan jumlah pelepasan beban minimum dan lokasi pelepasan beban yang tepat dengan mempertimbangkan dinamika sistem tenaga. Selain itu, desain pelepasan beban juga dirancang untuk sistem tenaga listrik yang terkoneksi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang digerakkan oleh *doubly fed induction generator (DFIG)* untuk menjaga kestabilan tegangan setelah terjadinya gangguan besar. Desain pelepasan beban ini mempertimbangkan pemodelan dinamis dari beban serta model dinamis turbin angin. Teknik yang diusulkan dalam penelitian ini adalah algoritma iteratif berdasarkan analisis sensitivitas lintasan tegangan sistem untuk memecahkan masalah pelepasan beban. Beban yang akan dilepaskan untuk setiap iterasi diatur dalam jumlah kecil. Selanjutnya, Faktor Sensitivitas Lintasan (FSL) untuk bus beban dan bus PLTB dihitung untuk memberikan informasi tentang bus beban yang memiliki pengaruh besar dalam meningkatkan kestabilan sistem. Bus dengan FSL tertinggi kemudian dipilih sebagai lokasi yang pelepasan beban.

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh pemodelan beban komposit terhadap kestabilan tegangan setelah terjadi gangguan besar yang menyebabkan hilangnya saluran transmisi dalam sistem. Simulasi dinamis dilakukan dengan sistem tenaga listrik Indonesia; sistem tenaga listrik interkoneksi Sulawesi Selatan dan Sistem IEEE 14 Bus *Reliability Test System* dengan skema

pelepasan beban yang diusulkan. Sistem regional Indonesia yang dipilih memiliki jumlah beban dinamis yang besar berupa beban pendingin udara dan pompa air yang dinamikanya berkontribusi besar terhadap kompleksitas kestabilan sistem. Hasil dari penelitian ini menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam level tegangan serta margin kestabilan tegangan.

**To my husband, my parents and
my children**

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
ABSTRAK	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR ISTILAH	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
BAB II PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENURUNAN TEGANGAN (<i>UNDER-VOLTAGE LOAD SHEDDING</i>)	7
2.1 Filosofi Pelepasan Beban (<i>Under-Voltage Load Shedding</i>).....	7
2.2 Tujuan dan Fundamental Pelepasan Beban.....	11
2.3 Jenis Skema Pelepasan Beban Akibat Penurunan Tegangan.....	13
2.4 Metode-metode Pelepasan Beban.....	16
2.5 Skema Pelepasan Beban pada Sistem Tenaga yang Terintegrasi PLTB	19
BAB III PEMODELAN SISTEM TENAGA LISTRIK	23
3.1 Pemodelan Generator Sinkron	23
3.2 Pemodelan Beban.....	26
3.2.1 Pemodelan Beban Statis	27
3.2.2 Pemodelan Beban Dinamis	28
3.3 Pemodelan Regulator Tegangan Otomatis	28
3.4 Sistem Kontrol DFIG	29
BAB IV DESAIN PELEPASAN BEBAN DENGAN SENSITIVITAS LINTASAN	33
4.1 Analisis Kestabilan Tegangan Dinamis.....	33
4.2 Analisis Sensitivitas Daya Aktif - Tegangan Dinamis	34
4.3 Faktor Sensitivitas Lintasan (FSL)	36

4.4	Batasan Kestabilan, Tujuan Optimasi, dan Margin Kestabilan Tegangan.....	41
BAB V	IMPLEMENTASI DAN EVALUASI SKEMA PELEPASAN BEBAN BERBASIS SIMULASI DOMAIN WAKTU	43
5.1	Sistem Uji: Sistem Tenaga Listrik Sulawesi Selatan	43
5.1.1	Gambaran Umum Sistem Studi [64]	43
5.1.2	Komposisi Beban.....	45
5.2	Studi Kasus dan Analisis Sistem Sulawesi Selatan...	47
5.2.1	Kasus 1: Gangguan antara bus 8 dan 10.....	47
5.2.2	Kasus 2: Gangguan antara bus 17 dan 19....	59
5.3	Sistem IEEE 14 Bus Reliability Test System	62
5.3.1	Tanpa PLTB Terhubung ke Sistem	62
5.3.2	Dengan PLTB Terhubung ke Bus 14	70
BAB VI	KESIMPULAN	81
	DAFTAR PUSTAKA.....	84

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Komposisi Beban	46
Tabel 2	Parameter Motor Induksi [22].....	46
Tabel 3	Perhitungan FSL.....	52
Tabel 4	Nilai FSL untuk Setiap Iterasi.....	54
Tabel 5	Lokasi Pelepasan Beban untuk Kasus 1	55
Tabel 6	Margin Kestabilan Tegangan (<i>Voltage Stability Margin</i>).....	58
Tabel 7	Lokasi Pelepasan Beban untuk Kasus 2.....	60
Tabel 8	Perbandingan antara Kasus 1 dan Kasus 2	61
Tabel 9	Perhitungan FSL untuk kasus tanpa PLTB.....	66
Tabel 10	Nilai FSL untuk kasus tanpa PLTB	68
Tabel 11	Lokasi pelepasan beban untuk kasus tanpa PLTB	69
Tabel 12	Parameter DFIG	70
Tabel 13	Perhitungan FSL untuk kasus dengan PLTB.....	74
Tabel 14	Lokasi Pelepasan Beban dengan PLTB.....	76
Tabel 15	Perbandingan skema pelepasan beban tanpa atau dengan PLTB	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Model generator sinkron order ke-6 [54, 55]	26
Gambar 2	Skema rangkaian pemodelan beban gabungan [56]	27
Gambar 3	Model sistem eksitasi AVR IEEE Tipe 1 standar [60]	29
Gambar 4	Konfigurasi teknologi turbin angin DFIG	30
Gambar 5	Skema sistem pengontrolan kecepatan rotor DFIG [55]	31
Gambar 6	Skema sistem pengontrolan tegangan DFIG [55]	31
Gambar 7	Flowchart skema pelepasan beban yang diusulkan	41
Gambar 8	Diagram garis tunggal studi kasus [64].....	44
Gambar 9	Skema representasi beban di wilayah Kota Makassar.....	45
Gambar 10	Penurunan tegangan di semua bus setelah gangguan antara bus 8 dan 10.....	48
Gambar 11	<i>Voltage collapse</i> pada bus 10 – 14 setelah gangguan antara bus 8 dan 10.....	49
Gambar 12	Penurunan tegangan pada bus 8 dan 9 setelah gangguan antara bus 8 dan 10.....	49
Gambar 13	Penurunan tegangan pada bus 22 dan 23 setelah gangguan antara bus 8 dan 10.....	50
Gambar 14	Sensitivitas lintasan tegangan dinamis jika pelepasan beban 5 MW diterapkan ke bus 13...51	
Gambar 15	Sensitivitas lintasan tegangan dinamis jika pelepasan beban 5 MW diterapkan ke bus 3.....	52
Gambar 16	Nilai FSL pada iterasi pertama	53
Gambar 17	Peningkatan tegangan setelah pelepasan beban 30 MW pada bus 13, 9 dan 23 untuk Kasus 1...55	

Gambar 18	Profil tegangan setelah pelepasan beban 30 MW pada bus 13	56
Gambar 19	Kurva PV pra-kontingensi bus 12	58
Gambar 20	Penurunan tegangan di semua bus setelah gangguan antara bus 17 dan 19	59
Gambar 21	Peningkatan tegangan setelah pelepasan beban 30 MW pada bus 12, 8, 13 dan 23 untuk Kasus 2	61
Gambar 22	Sistem uji - IEEE 14 Bus Reliability Test System (RTS).....	63
Gambar 23	Penurunan tegangan di semua bus setelah gangguan antara bus 6 dan bus 13 tanpa PLTB	63
Gambar 24	Penurunan tegangan di bus kritis setelah gangguan antara bus 6 dan bus 13 tanpa PLTB	64
Gambar 25	Sensitivitas lintasan tegangan bus dari bus kritis jika pelepasan beban 5 MW di bus 14.....	65
Gambar 26	Sensitivitas lintasan tegangan bus dari bus kritis jika pelepasan beban 5 MW di bus 6	66
Gambar 27	Nilai FSL pada iterasi pertama tanpa PLTB	68
Gambar 28	Peningkatan profil tegangan setelah pelepasan beban tanpa PLTB	69
Gambar 29	Penurunan tegangan di semua bus setelah gangguan antara bus 6 dan bus 13 mempertimbangkan PLTB	71
Gambar 30	Penurunan tegangan di bus kritis setelah gangguan antara bus 6 dan bus 13 mempertimbangkan PLTB	71
Gambar 31	Sensitivitas lintasan tegangan bus dari bus kritis jika pelepasan beban 5 MW di bus 13	73
Gambar 32	Sensitivitas lintasan tegangan bus dari bus kritis jika pelepasan beban 5 MW di bus 14.....	73
Gambar 33	Sensitivitas lintasan tegangan PLTB dengan pelepasan beban 5 MW diterapkan pada bus 14, 13 dan 3	74
Gambar 34	Nilai FSL pada iterasi pertama dengan PLTB ..	75

Gambar 35	Peningkatan profil tegangan setelah pelepasan beban dengan PLTB	76
Gambar 36	Penurunan tegangan di bus PLTB tanpa pelepasan beban	79
Gambar 37	Perbaikan tegangan di bus PLTB setelah pelepasan beban di bus 13 dan bus 14.....	79
Gambar 38	Penurunan tegangan di bus PLTB setelah pelepasan beban di bus 3	80

DAFTAR ISTILAH

FSL	Faktor Sensitivitas Lintasan
PLTB	Pembangkit Listrik Tenaga Bayu
UFLS	<i>under-frequency load shedding</i>
UVLS	<i>under-voltage load shedding</i>
VSM	<i>voltage stability margin</i>
E'_d	tegangan transien stator sumbu- d terkait dengan komponen fluks transien rotor
E'_q	tegangan transien stator sumbu- q terkait dengan komponen fluks transien rotor
E_f^*	tegangan pemagnetan
H	konstanta inersia
I_d	elemen arus stator sumbu- d
I_q	elemen arus stator sumbu- q
T'_{do}	konstanta waktu transien sumbu- d
T'_{qo}	konstanta waktu transien sumbu- q
T''_{do}	konstanta waktu subtransien sumbu- d
T''_{qo}	konstanta waktu subtransien sumbu- q
T_{FW}^*	torsi peredam ekstra terhadap kecepatan rotor
T_M	torsi mekanik
X'_d	reaktansi transien sumbu- d
X'_q	reaktansi transien sumbu- q
X''_d	reaktansi subtransien sumbu- d
X''_q	reaktansi subtransien sumbu- q
X_{ls}	reaktansi bocor jangkar

δ	sudut daya rotor generator
ψ_d	medan elektromagnetik subtransien sebagai hasil dari hubungan fluks peredam sumbu- d
ψ_q	medan elektromagnetik subtransien sebagai hasil dari hubungan fluks peredam sumbu- q
ω	kecepatan sudut rotor generator
ω_s	kecepatan rotor sinkron generator ($2\pi f$)
P_{Li}	beban aktif di bus i
Q_{Li}	beban reaktif di bus i
P_{Li}^0	beban aktif sesuai dengan tegangan bus awal
Q_{Li}^0	beban reaktif sesuai dengan tegangan bus awal
α_P	elemen impedansi konstan dari beban aktif
α_Q	elemen impedansi konstan dari beban reaktif
β_P	elemen arus konstan dari beban aktif
β_Q	elemen arus konstan dari beban reaktif
γ_P	elemen daya konstan dari beban aktif
γ_Q	elemen daya konstan dari beban reaktif
V_i	tegangan operasi sebenarnya pada bus i
$P_s(V)$	beban daya aktif <i>steady-state</i> sebagai fungsi tegangan
$Q_s(V)$	beban daya reaktif <i>steady-state</i> sebagai fungsi tegangan
$P_t(V)$	beban daya aktif transien sebagai fungsi tegangan

$Q_t(V)$	beban daya reaktif transien sebagai fungsi tegangan
P_d	daya aktif sesaat
Q_d	daya reaktif sesaat
T_p	konstanta waktu daya aktif
T_q	konstanta waktu daya reaktif
x_p	variabel status beban daya aktif
x_q	variabel status beban daya reaktif
P_{shed_j}	jumlah pelepasan beban di bus j
n_k	jumlah bus kritis
n_{PLTB}	jumlah akumulasi dari bus PLTB
t_k	waktu instan
t_s	jumlah waktu instan

PENDAHULUAN

Sejak tahun 1920-an, kestabilan sistem tenaga listrik telah dianggap sebagai prasyarat penting untuk operasi sistem tenaga listrik yang aman dan andal [1]. Seiring dengan perkembangan sistem tenaga listrik menjadi lebih kompleks, dan dengan meningkatnya jumlah interkoneksi, integrasi sumber energi terbarukan, sistem transmisi arus searah serta pasar listrik kompetitif, masalah kestabilan tegangan juga menjadi lebih penting, karena karakteristik kestabilan dari sistem menjadi lebih rumit dari sebelumnya [2]. Selama penjadwalan dan operasi sistem tenaga, masalah kestabilan tegangan telah menjadi perhatian utama, karena banyaknya kegagalan sistem yang disebabkan oleh ketidakstabilan tegangan akibat adanya gangguan sistem atau kenaikan beban secara tiba-tiba. Ada dua jenis tindakan yang dapat dilakukan untuk mencegah ketidakstabilan tegangan, yaitu tindakan pencegahan (*preventive action*) dan tindakan korektif (*corrective action*). Tindakan

pengecahan diambil dalam keadaan pra-kontingensi untuk meningkatkan margin kestabilan tegangan, sementara tindakan korektif biasanya dilakukan selama konfigurasi pasca-kontingensi untuk memulihkan kestabilan sistem. Di antara berbagai tindakan korektif yang dapat diterapkan untuk mencegah ketidakstabilan tegangan, pelepasan beban atau pengurangan beban dapat dianggap sebagai tindakan korektif yang murah dan andal. Namun demikian, pelepasan beban harus menjadi tindakan pertahanan terakhir ketika tidak ada alternatif lain yang tersedia untuk mencegah kemungkinan terjadinya *voltage collapse*. Pelepasan beban memainkan peran penting dalam kendali dan kestabilan sistem tenaga listrik ketika sistem mengalami gangguan besar. Berbagai penelitian telah mengkonfirmasi bahwa pelepasan beban adalah tindakan penanggulangan yang efektif untuk mencegah ketidakstabilan frekuensi atau tegangan. Pelepasan beban adalah salah satu solusi parsial hemat biaya untuk tantangan kestabilan tegangan dan frekuensi. Hal ini telah lama digunakan sebagai upaya terakhir untuk menghindari kerusakan pada sistem tenaga listrik utama dengan mengoperasikan *under-frequency relays* atau *under-voltage relays* [3].

Dalam literatur, banyak metode telah dikembangkan untuk merancang skema pelepasan beban akibat penurunan tegangan atau *under-voltage load shedding* (UVLS) yang efektif. Kebanyakan dari

metode ini menggunakan analisis kestabilan tegangan statis atau dinamis. Penelitian [4-16] mengembangkan metode pelepasan beban menggunakan analisis kestabilan tegangan statis. Namun, kelemahan dari teknik analisis tegangan statis adalah tidak dapat mendeskripsikan karakter dinamis dari terjadinya *voltage collapse*. Analisis kestabilan tegangan statis dan kuasi-statis didasarkan pada *snapshot* aliran daya dan metode ini tidak mempertimbangkan pemodelan dinamis sistem tenaga listrik. Di sisi lain, simulasi domain waktu memegang peran penting dalam mengevaluasi mekanisme fenomena *voltage collapse*.

Penelitian-penelitian di [17-20] menyelidiki skema pelepasan beban berdasarkan simulasi domain waktu. Meskipun studi ini mengusulkan pelepasan beban berdasarkan simulasi domain waktu, namun dalam penelitian-penelitian ini, pemodelan beban rinci (model beban statis dan dinamis) tidak dipertimbangkan. Pemodelan beban memegang peranan penting dalam analisis kestabilan tegangan dinamis serta desain pelepasan beban, sehingga pemodelan beban yang tepat akan memberikan dampak yang signifikan terhadap keakuratan hasil simulasi.

Berdasarkan pembahasan di atas, ada sejumlah besar penelitian yang telah menyelidiki dan mengusulkan skema pelepasan beban yang berbeda. Namun, penelitian-penelitian tersebut tidak

mempertimbangkan pemodelan beban secara rinci dan tidak sepenuhnya memperhitungkan pemodelan dinamik sistem terutama dari proporsi mayoritas beban motor induksi dalam sistem tenaga listrik.

Dalam sistem tenaga modern dengan jumlah beban pendingin udara yang cukup besar, dengan hanya model beban statis dalam simulasi domain waktu, simulasi tidak memadai untuk mengevaluasi proses *voltage collapse*. Khususnya di Indonesia, banyak sistem interkoneksi terhubung dengan beban pendingin udara dan beban pompa air yang jumlahnya signifikan. Ketika sistem tenaga menjadi sangat *stress* dan bekerja pada batasnya dengan pengurangan kapasitas dan margin kestabilan, representasi karakteristik beban yang lebih tepat menjadi lebih penting. Ketidakstabilan dalam sistem tenaga dengan jumlah beban motor dinamis yang cukup besar dapat mengakibatkan perbaikan tegangan yang lambat atau penurunan tegangan yang cepat [21]. Ketidaktepatan pemodelan beban dinamis dalam simulasi domain waktu dianggap menjadi alasan utama ketidakkonsistenan antara pengukuran sebenarnya dan hasil simulasi [22]. Motor mengalami kesulitan untuk berakselerasi kembali setelah gangguan utama dan dapat mengganggu perbaikan profil tegangan [23]. Motor induksi dapat berhenti dan menarik arus tinggi dan mengakibatkan percepatan penurunan tegangan di beberapa area dalam sistem. Untuk merancang skema pelepasan

beban yang andal, sangatlah penting untuk merepresentasikan pemodelan beban termasuk motor induksi secara tepat. Selain itu, pemodelan beban yang tepat akan memberikan dampak yang signifikan terhadap keakuratan hasil simulasi. Oleh karena itu, maka sangat penting untuk menentukan teknik pelepasan beban yang optimal dan lebih tepat yang menggabungkan pemodelan motor induksi dinamis.

Dalam tulisan ini, metode analitik dan sistematis baru dirancang untuk skema pelepasan beban (UVLS) yang strategis dengan menggabungkan analisis sensitivitas tegangan dinamis sebagai pendekatan untuk menentukan jumlah dan lokasi pelepasan beban dalam sistem tenaga dalam simulasi domain waktu. Metode yang diusulkan melibatkan prosedur iterasi yang menghitung sensitivitas tegangan dinamis bus sehubungan dengan jumlah pelepasan beban. Pada setiap tahap, kuantitas pelepasan beban diatur ke jumlah kecil sekitar 1% dari total beban. Selain itu, dibuat formulasi baru yaitu Faktor Sensitivitas Lintasan (FSL) berdasarkan sensitivitas tegangan dinamis untuk menentukan lokasi pelepasan beban. Selanjutnya, skema pelepasan beban yang diusulkan dievaluasi berdasarkan margin kestabilan tegangan (*voltage stability margin*).

Lebih lanjut, tingkat penetrasi Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang tinggi telah membuat masalah pelepasan beban dalam sistem

tenaga modern menjadi lebih menantang. Lebih banyak PLTB yang terintegrasi ke dalam sistem tenaga listrik akan mengubah struktur sistem distribusi dan akan membuat skema pelepasan beban lebih rumit.

Oleh karena itu, untuk memenuhi *research gap* yang penting ini, penelitian ini bertujuan untuk memberikan kontribusi berikut:

- i. Skema pelepasan beban (UVLS) baru dikembangkan menggunakan analisis kestabilan tegangan dinamis (simulasi domain waktu),
- ii. Pemodelan beban statis dan dinamis yang terperinci dipertimbangkan dan komposisi beban disertakan untuk desain pelepasan beban yang lebih realistis, andal, dan efektif.
- iii. Formulasi baru Faktor Sensitivitas Lintasan (FSL) diformulasikan untuk menentukan lokasi dan jumlah pelepasan beban.
- iv. Perancangan pelepasan beban memperhatikan integrasi PLTB dalam sistem tenaga listrik.



BAB II

PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENURUNAN TEGANGAN (*UNDER-VOLTAGE LOAD SHEDDING*)

2.1 FILOSOFI PELEPASAN BEBAN (*UNDER-VOLTAGE LOAD SHEDDING*)

Dalam beberapa tahun terakhir, masalah kestabilan tegangan dan frekuensi dalam sistem tenaga listrik telah menjadi subjek dari sejumlah besar penelitian. Dalam sistem tenaga yang lebih kompleks, masalah kestabilan tegangan juga menjadi lebih parah. Banyak sistem besar yang saling terinterkoneksi di dunia secara progresif mengalami gangguan sistem yang tidak dapat diterima. Level tegangan tinggi atau rendah yang menjadi ancaman utama bagi kestabilan, keamanan dan keandalan dari sistem tenaga [24]. Ada dua langkah pertahanan sistem tenaga terhadap insiden yang mungkin

memicu ketidakstabilan, karena sistem menjadi lebih *stress* dan beroperasi lebih dekat ke batas kestabilannya [25]:

- Tindakan preventif (*preventive action*) untuk menganalisis margin kestabilan sistem dengan mempertimbangkan kemungkinan kontingensi yang berbeda kemudian melakukan tindakan yang tepat untuk menjaga margin tegangan sistem yang cukup.
- Tindakan korektif (*corrective action*) untuk mengurangi risiko yang lebih parah dengan memanfaatkan skema korektif otomatis dengan sistem proteksi.

Ketika sistem tenaga listrik masuk ke dalam kondisi yang tidak stabil, ada beberapa tindakan mitigasi yang dapat dilakukan, seperti: penggunaan perangkat kompensasi daya reaktif, mengendalikan tegangan jaringan dan output reaktif generator, koordinasi proteksi/kontrol, mengatur tap transformator dan solusi terakhir: pelepasan beban (*load shedding*) [26]. Penelitian telah membuktikan bahwa pelepasan beban adalah tindakan kontra yang efektif untuk menghindari ketidakstabilan tegangan (*voltage instability*) atau *voltage collapse*. Pelepasan beban adalah solusi parsial untuk tantangan kestabilan tegangan dan frekuensi. Pelepasan beban telah digunakan untuk waktu yang lama sebagai upaya terakhir untuk menghindari kerusakan sistem daya utama yang disebabkan oleh penurunan

frekuensi atau tegangan [27].

Secara tradisional, pelepasan beban telah digunakan untuk mengembalikan keseimbangan antara daya aktif yang dibangkitkan dan beban dengan cara mengaktifkan *under-frequency relays* setelah mendeteksi ketidakseimbangan daya aktif [28]. Namun, seiring dengan perkembangan sistem tenaga listrik, ketidakstabilan tegangan lebih sering terjadi daripada *islanding* dengan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Investigasi dari *blackout* yang terjadi belakangan ini membuktikan bahwa penyebab utama dari hampir semua gangguan sistem tenaga adalah *voltage collapse* daripada kondisi *under-frequency* yang merupakan gangguan umum untuk *blackouts* pada tahun 1960-an dan 1970-an [29]. Selain itu, penelitian dalam *electrical islanding* dan pelepasan beban akibat penurunan frekuensi atau *under-frequency load shedding* (UFLS) telah menemukan kemungkinan *voltage collapse* ketika ketidakseimbangan daya aktif dalam sistem *islanding* lebih dari 50% [30]. Penurunan tegangan lebih cepat dari penurunan frekuensi. Hal ini disebabkan oleh operasi sistem tenaga listrik saat ini dibangun dengan pusat-pusat pembangkit yang terletak jauh dari pusat-pusat beban, yang membuat sistem sangat tergantung pada sistem transmisi. Penyaluran daya melalui jalur transmisi yang panjang akan menyebabkan penurunan nilai tegangan di pusat beban, meskipun frekuensi sistem dapat tetap normal

sampai terjadinya *system collapse*. Penurunan tegangan mempengaruhi beban yang sensitif terhadap perubahan tegangan (*voltage-sensitive loads*). Hal ini dapat memperlambat penurunan frekuensi dan menunda beroperasinya UFLS. Selain itu, UFLS mungkin tidak beroperasi dalam kasus *low voltage*. Dengan demikian pada tahun 1992, Carson Taylor [31] menyarankan untuk menambah skema penerapan pelepasan beban dengan memasukkan pelepasan beban akibat penurunan tegangan atau *under-voltage load shedding* (UVLS) bersama dengan *under-frequency load shedding* (UFLS) sebagai proteksi tambahan sistem untuk gangguan yang tidak biasa di luar perencanaan dan kriteria operasi.

Pelepasan beban atau *load shedding* adalah pilihan ekonomis untuk menjaga kestabilan tegangan sistem sebelum adanya pembangunan pembangkit baru atau saluran transmisi baru. Banyak utilitas tenaga listrik di seluruh dunia telah menerapkan skema pelepasan beban. Referensi [32] memberikan contoh aplikasi pelepasan beban yang ada di beberapa utilitas dengan pengaturan spesifik mereka. Filosofi dari pelepasan beban adalah bahwa setiap kali sistem terganggu, yang menyebabkan kondisi tegangan sistem turun ke bawah nilai yang telah ditentukan untuk jangka waktu yang telah ditentukan, sejumlah beban kemudian dilepaskan dari sistem [33]. Dengan demikian, diharapkan bahwa tegangan sistem akan

dapat kembali ke batas normal dengan memutuskan beberapa beban.

2.2 TUJUAN DAN FUNDAMENTAL PELEPASAN BEBAN

Tujuan dari pelepasan beban adalah untuk mengembalikan keseimbangan daya aktif dalam sistem, untuk mencegah *voltage collapse* dan untuk mengelola masalah penurunan tegangan (*voltage drop*) hanya dalam area lokal daripada membiarkan gangguan ini menyebar ke daerah lain [29]. Pelepasan beban harus mencakup beban yang cukup dan tidak boleh terlalu sensitif. Oleh karena itu, ada beberapa pertimbangan untuk memastikan pelepasan beban yang efisien sebagai berikut [33, 34]:

- *Penentuan jumlah beban yang akan dilepaskan*

Menentukan jumlah beban yang cukup ini sangat penting untuk memastikan pelepasan beban dapat mencegah keadaan ketidakstabilan tegangan. Pelepasan beban yang kurang dari jumlah beban yang harus diputus tidak akan efektif dalam mencegah *voltage collapse*, namun di sisi lain, pelepasan beban yang lebih banyak dari yang dibutuhkan dapat menyebabkan keadaan frekuensi lebih (*over-frequency*).

- *Pemilihan lokasi pelepasan beban*

Penelitian dalam [5] menunjukkan bahwa

pelepasan beban di lokasi yang tepat dapat mencegah ketidakstabilan tegangan. Namun, pelepasan beban dengan jumlah yang sama di lokasi yang berbeda akan memberikan sebuah hasil yang berbeda dan mungkin tidak efektif untuk meningkatkan kestabilan tegangan sistem.

- *Penentuan level tegangan untuk pelepasan beban*

Level tegangan untuk pelepasan beban harus tepat di atas level tegangan yang menunjukkan awal terjadinya *voltage collapse* serta di atas level tegangan di mana motor mulai *stall*, karena *post-voltage collapse* terjadi dengan sangat cepat. Level tegangan ini bisa sekitar 8-15% di bawah tegangan normal terendah [31]. Namun, tegangan normal terendah mungkin berbeda dari tegangan nominal sistem.

- *Penentuan waktu dan langkah waktu (time-steps) pelepasan beban*

Pelepasan beban sebaiknya dilakukan secara bertahap untuk mencegah kondisi pelepasan beban yang berlebih. Pemilihan langkah waktu yang tepat bergantung pada karakteristik beban, sumber pembangkit, dan tingkat perubahan tegangan. Waktu tunda minimum sebelum pelepasan beban diaktifkan harus cukup untuk mencegah *voltage collapse* serta untuk menghindari pelepasan beban yang tidak perlu selama periode transien.

2.3 JENIS SKEMA PELEPASAN BEBAN AKIBAT PENURUNAN TEGANGAN

Saat ini, ada dua skema pelepasan beban akibat penurunan tegangan (UVLS) yang dipasang secara umum, yaitu: pelepasan beban terdesentralisasi (*decentralized UVLS*) dan pelepasan beban terpusat (*centralized UVLS*) [33]. Pada kedua jenis skema pelepasan beban, relay tegangan dipasang di gardu distribusi primer yang dekat dengan gardu transmisi utama untuk mengukur tegangan pada sistem transmisi. Sistem pelepasan beban terdesentralisasi memiliki keandalan yang lebih baik daripada yang sistem terpusat karena diversifikasi. Kegagalan satu elemen tidak akan secara destruktif mengganggu operasi komponen pelepasan beban lainnya. Pelepasan beban dalam skema ini terkonsentrasi ke area tertentu di mana konsekuensi ketidakstabilan dirasakan paling kuat. Namun, dalam skema terpusat, relay tegangan ditempatkan pada lokasi yang paling tepat dalam sistem, tidak dibatasi lokasi yang dekat dengan beban yang sesuai. Tegangan sistem diamati di lokasi strategis yang dipilih, yang biasanya merupakan bus suplai vital. Dalam struktur ini, keputusan untuk melakukan pelepasan beban diambil setelah terjadinya tegangan rendah yang signifikan di seluruh sistem dengan cara komunikasi antara lokasi utama.

Bagian selanjutnya mengulas secara singkat kelebihan dan kekurangan masing-masing skema

berdasarkan referensi [33].

A. Keuntungan *Decentralized UVLS* daripada *Centralized UVLS*

- Sistem terdesentralisasi memiliki keandalan yang lebih baik daripada skema terpusat karena diversifikasinya. Kegagalan satu elemen tidak akan mengganggu operasi komponen pelepasan beban lainnya secara destruktif. Sebaliknya, sistem terpusat hanya bergantung pada satu atau beberapa relay, di mana kegagalan fungsi salah satu komponen dapat mengakibatkan kegagalan pelepasan beban total.
- Pelepasan beban dalam skema terdesentralisasi terkonsentrasi pada area tertentu di mana konsekuensi ketidakstabilan dirasakan paling kuat. Namun, dalam skema terpusat, beban dilepaskan ketika ketidakstabilan diidentifikasi tanpa memperhitungkan apakah tegangan beban rendah atau tidak.
- Skema terdesentralisasi tidak sepenuhnya bergantung pada sistem komunikasi untuk pengoperasiannya. Bahkan ketika fasilitas komunikasi gagal beroperasi, pelepasan beban akan tetap terjadi. Sebaliknya, pelepasan beban terpusat sangat bergantung pada peralatan komunikasinya.

B. Keuntungan *Centralized UVLS* daripada *Decentralized UVLS*

- Relay pengukur *under-voltage* dalam skema terpusat ditempatkan di lokasi yang paling tepat dalam sistem, tidak dibatasi untuk dekat dengan beban yang sesuai. Tegangan sistem diamati di lokasi strategis yang dipilih, yang biasanya merupakan bus suplai vital. Dalam bus penting ini, level tegangan dikontrol dengan aman di bawah pengaturan umum.
- Dalam struktur terpusat, keputusan untuk melakukan pelepasan beban diambil setelah penurunan tegangan yang signifikan terjadi di seluruh sistem melalui komunikasi antara lokasi utama. Tindakan ini bertujuan untuk menghindari pelepasan beban yang tidak perlu karena penurunan tegangan yang dipengaruhi oleh gangguan lokal yang tidak terkait dengan *voltage collapse*.
- Keandalan skema terpusat dapat ditingkatkan dengan menghubungkan indikator lain dari bagian mana pun dari sistem, seperti hilangnya saluran utama dan tegangan urutan nol selain level tegangan sistem, untuk memberikan prediksi yang lebih baik tentang kemungkinan *voltage collapse*.
- Dalam skema pelepasan beban terpusat, pengaturan relay pada bus terpusat lebih mudah

diperoleh karena waktu tunda yang singkat terkait dengan penurunan tegangan yang kecil lebih layak untuk disinkronkan dengan mekanisme *fault-clearing*.

- Pelepasan beban terpusat lebih ekonomis karena mesin pengukur dipasang hanya di beberapa tempat, sehingga lebih banyak sumber daya finansial utilitas dapat dialokasikan untuk perbaikan skema keputusan pelepasan beban terpusat.

2.4 METODE-METODE PELEPASAN BEBAN

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menyelidiki tindakan preventif dan korektif untuk mencegah ketidakstabilan menggunakan analisis kestabilan tegangan. Analisis kestabilan tegangan adalah instrumen penting untuk memprediksi kemungkinan ketidakstabilan dan secara umum dapat dikategorikan ke dalam: analisis kestabilan tegangan statis, kuasi-statis, dan dinamis [35].

Dalam literatur, banyak metode telah dikembangkan untuk merancang skema pelepasan beban yang efektif. Kebanyakan dari metode ini menggunakan analisis kestabilan tegangan statis atau dinamis. Bagian ini akan memberikan gambaran umum tentang metode pelepasan beban yang ada. Para penulis di makalah [4] mengembangkan model optimasi dengan *relaxation restrictions* untuk

menghitung pelepasan beban minimal. Sebuah metode pelepasan beban berdasarkan *modal participation factors* diusulkan di [5] untuk mengidentifikasi lokasi pelepasan beban. Metode multistap untuk menentukan lokasi dan jumlah minimum pengurangan beban dirancang oleh [6]. Penulis dalam [7] mengembangkan skema pelepasan beban berdasarkan pemodelan nilai integer dan menyajikan *interruption penalty factor* untuk *feeder* dan *participation penalty factor* untuk bus untuk meminimalkan pelepasan beban total. Sebuah skema pelepasan beban dirancang dengan menggunakan *particle swarm optimization* (PSO) di [8]. Pengoptimalan berbasis pembelajaran mengajar atau *teaching learning based optimization* (TLBO) diimplementasikan di [9] untuk pelepasan beban. Penelitian di [10] merumuskan aliran daya optimal AC berbasis risiko atau *improved risk-based AC security-constrained optimal power flow* (RB-SCOPF) untuk jumlah pelepasan beban. Pelepasan beban berbasis OPF lain untuk menentukan jumlah, tempat, derajat, dan waktu pelepasan beban untuk mempertahankan margin kestabilan tegangan yang telah ditentukan diusulkan oleh [11] dan aliran daya optimal berbasis optimisasi linier atau *linear optimization-based optimal power flow* (LP-OPF) untuk pelepasan beban diajukan oleh [12]. Penelitian di [13] menetapkan persyaratan pelepasan beban dari kriteria *extended equal area criterion* (EEAC). Para penulis di [14] merekomendasikan teknik untuk

menentukan lokasi pelepasan beban dengan mempertimbangkan multi-kontingensi dengan melacak indeks kestabilan dan untuk menghitung jumlah pelepasan beban dengan menggunakan sistem logika fuzzy yang dimodifikasi. *Hybrid imperialist competitive algorithm-pattern search* (HICA-PS) digunakan untuk pelepasan beban di [15]. Dalam penelitian [16], penulis mempresentasikan skema pelepasan beban dengan menggunakan nilai eigen dari matriks Jacobian untuk menentukan lokasi pelepasan beban dan menggunakan algoritma genetika atau *genetic algorithm* (GA) dan *neural network* (NN) untuk menghitung jumlah pelepasan beban. Namun, skema pelepasan beban dalam penelitian-penelitian ini dikembangkan berdasarkan pendekatan analisis kestabilan tegangan statis. Kelemahan dari teknik analisis tegangan statis adalah tidak dapat memperlihatkan karakter dinamis dari terjadinya *voltage collapse*. Analisis kestabilan tegangan statis dan kuasi-statis didasarkan pada *snapshot* aliran daya dan metode ini tidak mempertimbangkan pemodelan dinamis sistem. Di sisi lain, simulasi domain waktu memegang peran penting dalam menilai mekanisme fenomena *voltage collapse*.

Studi di [17-20] menyelidiki skema pelepasan beban berdasarkan simulasi domain waktu. Sebuah UVLS berdasarkan model adaptif prediktif kontrol atau *model predictive control* (MPC) dikembangkan

oleh [17]. Skema *remedial action scheme* (RAS) dibuat di [18] di mana kandidat lokasi pelepasan beban diberi peringkat menurut kategori dan pengaruhnya pada kestabilan sistem. Para penulis di [19] menganalisis dampak perilaku jaringan dengan berbagai skema pelepasan beban. Studi pada [20] menyajikan skema pelepasan beban berbasis indeks kestabilan area luas (*wide area voltage stability index*) dan menggunakan *discrete imperialistic competition algorithm* (DICA) yang dimodifikasi untuk menyelesaikan permasalahan pelepasan beban. Meskipun penelitian-penelitian ini mengusulkan pelepasan beban berdasarkan simulasi domain waktu, namun dalam penelitian-penelitian ini, pemodelan beban rinci (model beban statis dan dinamis) tidak dipertimbangkan. Namun demikian, pemodelan beban penting dan memegang peranan penting dalam penilaian kestabilan tegangan dinamis serta desain pelepasan beban, sehingga pemodelan beban yang tepat akan memberikan dampak yang signifikan terhadap keakuratan hasil simulasi.

2.5 SKEMA PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM TENAGA YANG TERINTEGRASI PLTB

Pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang paling populer dipasang di sistem tenaga listrik saat ini adalah *doubly fed induction generator* (DFIG). DFIG adalah mesin dengan kecepatan variabel tetapi dapat memberikan daya dengan tegangan dan

frekuensi yang konstan meskipun kecepatan rotor berfluktuasi. Lebih lanjut lagi, apabila sebuah konverter dua arah dipasang pada rotor, rentang kecepatan rotor dapat diperpanjang melampaui kecepatan sinkron; sehingga, daya listrik dihasilkan baik dari stator maupun rotor [36]. DFIG memiliki beberapa keunggulan, seperti kecepatan variabel operasi untuk mendapatkan daya maksimum yang diekstraksi dari angin, faktor daya yang dapat diatur, efisiensi yang lebih baik, kemampuan untuk mengendalikan daya reaktif tanpa dukungan kapasitif dan kurang rating converter [37, 38].

Penetrasi pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) yang tinggi di jaringan akan mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik, terutama kestabilan tegangan, oleh karena itu, pengaruh PLTB pada kestabilan sistem telah menjadi subyek penelitian intensif selama beberapa tahun terakhir [39-45]. Salah satu bidang yang tidak mendapatkan banyak perhatian sejauh ini pelepasan beban (UVLS) di sebuah sistem tenaga dengan PLTB. UVLS memainkan peran penting dalam pengendalian daya ketika sistem tenaga listrik mengalami gangguan besar. Penelitian telah memvalidasi bahwa pelepasan beban adalah tindakan pencegahan yang efektif terhadap *voltage collapse*. Dengan integrasi sejumlah besar PLTB ke jaringan, ada sebuah kebutuhan untuk operator sistem untuk mempertahankan PLTB agar PLTB tetap memasok daya ke sistem ketika terjadi

voltage collapse daripada memutuskan suplai daya dari PLTB [46]. Namun demikian, karena stator DFIG terhubung langsung dengan sistem dan keterbatasan rating eksitasi konverter, PLTB dapat memasok daya asinkron ke jaringan dan menjadi lebih responsif terhadap gangguan [47]. Ketika sistem daya mendapatkan sebuah gangguan besar, transfer daya dari PLTB ke sistem turun. Ketimpangan antara daya mekanik dan listrik dalam generator menaikkan kecepatan turbin angin, sehingga kecepatannya menjadi lebih cepat [48]. Seiring penambahan kecepatan, PLTB kemudian menarik lebih banyak daya reaktif sehingga menyebabkan tegangan sistem semakin turun. Setelah gangguan sistem diamankan, DFIG hanya mampu kembali ke kondisi operasi normal hanya jika kecepatan generator tidak berada di atas kecepatan kritis [49]. Oleh karena itu, dalam desain pelepasan beban masalah ini harus menjadi dipertimbangkan, sehingga skema pelepasan beban dapat memastikan bahwa PLTB dapat memulihkan kondisi operasi normal dan tegangan sistem dapat kembali ke batas kestabilannya.

Sebuah penelitian dalam referensi [50] mengusulkan sebuah desain pelepasan beban di sebuah sistem tenaga dengan *distributed generations* (DG), tetapi penelitian ini hanya menggunakan pendekatan analisis tegangan statis dan tidak mempertimbangkan jenis DG. Kelemahan dari pendekatan ini, tidak dapat memperlihatkan proses

dinamis dari insiden *voltage collapse*. Selain itu, dengan pemasangan luas PLTB dan DG lainnya, perilaku dinamis sistem akan berubah secara substansial setelah terganggu karena teknologi yang berbeda dari DG dan generator konvensional [51].

PEMODELAN SISTEM TENAGA LISTRIK

Langkah pertama dari evaluasi kestabilan tegangan dinamis adalah menggunakan pemodelan sistem tenaga yang tepat. Hal ini termasuk elemen kunci dari sistem tenaga, yaitu generator, jaringan dan beban untuk kondisi tunak dan dinamis. Bagian berikut ini menjelaskan pemodelan sistem untuk skema pelepasan beban yang diusulkan.

3.1 PEMODELAN GENERATOR SINKRON

Model generator sinkron yang digunakan dalam penelitian ini adalah model mesin sinkron order ke-6 yang mendetail. Model mesin sinkron order ke-6 mempertimbangkan empat gulungan adanya rangkaian pemagnetan dan rangkaian tambahan. Namun demikian, transien jaringan dan stator pada model mesin sinkron order ke-6 diabaikan. Dinamika yang dihasilkan oleh transien ini dapat diabaikan dan

akan memberikan hasil yang sedikit konservatif, yang lebih cocok untuk analisis dinamis, terutama untuk *screening* cepat untuk mengidentifikasi dan mengenali semua konsekuensi kritis dan tidak stabil [52]. Dalam kestabilan tegangan dinamis, persamaan diferensial untuk subtransient dari model mesin sinkron order ke-6 diberikan oleh persamaan berikut [53],

$$T'_{do} \frac{dE'_q}{dt} = -E'_q - (X_d - X'_d) \left[I_d - \left(\frac{X'_d - X''_d}{(X'_d - X_{ls})^2} \right) \{ \psi_d + (X'_d - X_{ls}) I_d + E'_q \} \right] + E_f^* \quad (1)$$

$$T''_{do} \frac{d\psi_d}{dt} = -\psi_d + E'_q - (X'_d - X_{ls}) I_d \quad (2)$$

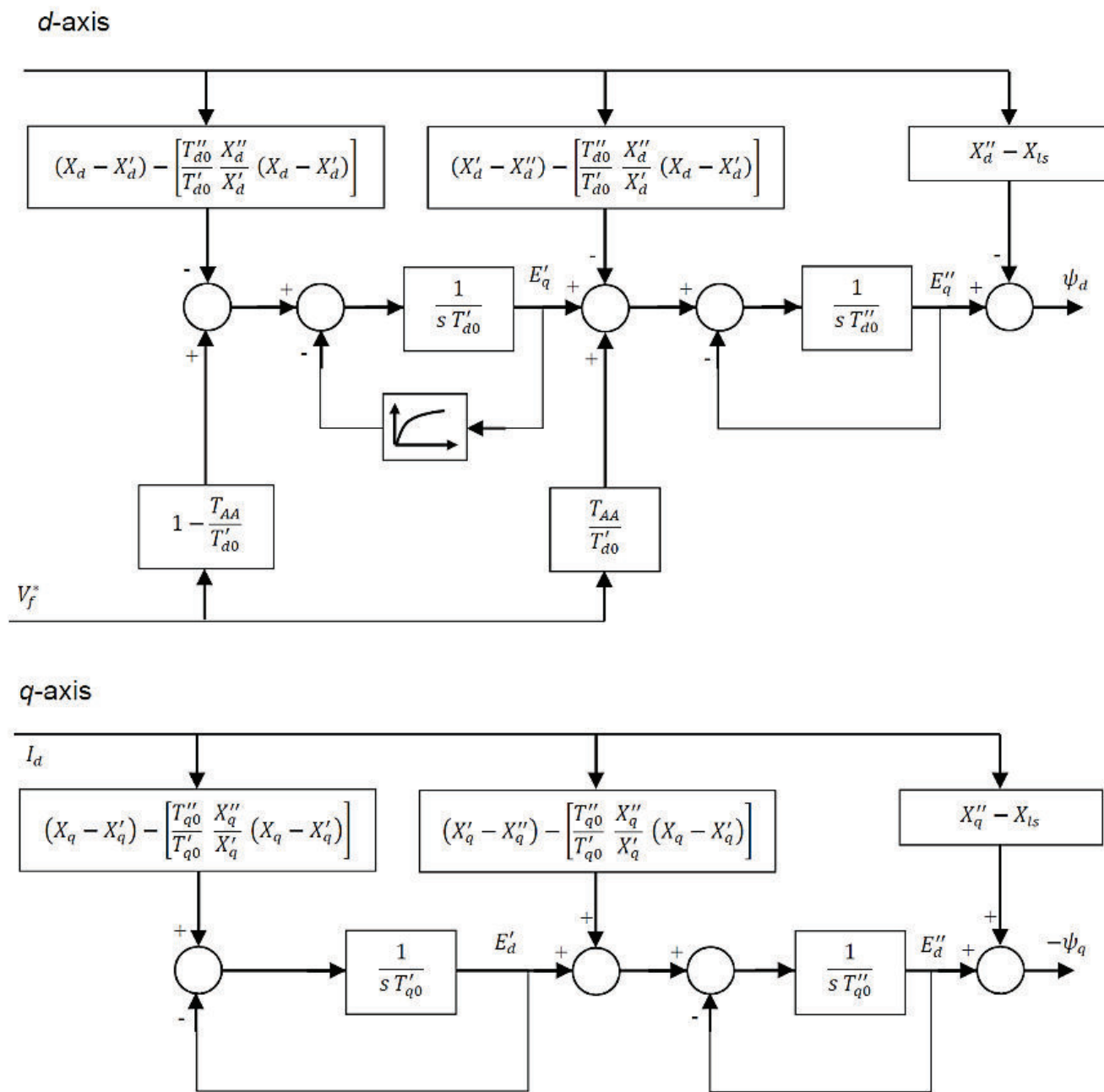
$$T'_{qo} \frac{dE'_d}{dt} = -E'_d + (X_q - X'_q) \left[I_q - \left(\frac{X'_q - X''_q}{(X'_q - X_{ls})^2} \right) \{ \psi_q + (X'_q - X_{ls}) I_q + E'_d \} \right] \quad (3)$$

$$T''_{qo} \frac{d\psi_q}{dt} = -\psi_q + E'_d - (X'_q - X_{ls}) I_q \quad (4)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = & T_M - \left(\frac{X_d'' - X_{ls}}{X_d' - X_{ls}} \right) E_q' I_q \\ & - \left(\frac{X_d' - X_d''}{X_d' - X_{ls}} \right) \psi_d I_q - \left(\frac{X_q'' - X_{ls}}{X_q' - X_{ls}} \right) E_d' I_d \\ & + \left(\frac{X_q' - X_q''}{X_q' - X_{ls}} \right) \psi_q I_d - (X_q'' - X_d'') I_d I_q \\ & - T_{FW}^* \end{aligned} \quad (6)$$

Adapun gambar rangkaian ekuivalen dari model mesin sinkron order ke-6 dapat dilihat pada Gambar 1 [54, 55].

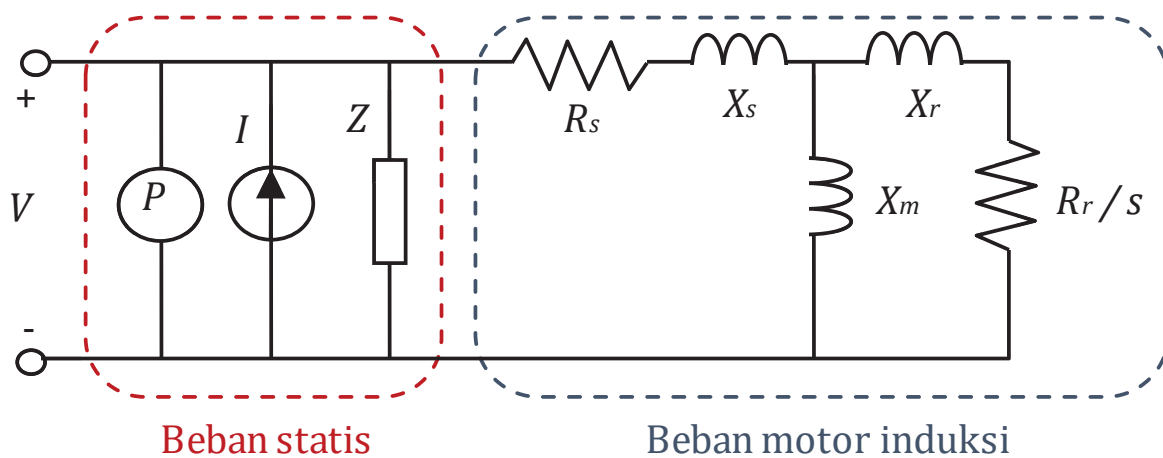


Gambar 1 Model generator sinkron order ke-6 [54, 55]

3.2 PEMODELAN BEBAN

Pemodelan beban adalah salah satu elemen terpenting dalam analisis kestabilan tegangan dinamis termasuk pelepasan beban. Dalam studi ini, beban pada masing-masing bus didemonstrasikan sebagai model beban gabungan yang merupakan campuran dari model beban statis dan dinamis. Gambar 2 menunjukkan rangkaian ekivalen model

beban, di mana Z adalah impedansi konstan; I adalah arus konstan; P adalah kekuatan konstan; X_m adalah reaktansi magnetisasi; X_s adalah reaktansi bocor stator; X_r adalah resistansi kebocoran rotor; R_s adalah resistansi stator; R_r adalah resistansi rotor; dan s adalah *slip* motor induksi.



Gambar 2 Skema rangkaian pemodelan beban gabungan [56]

3.2.1 Pemodelan Beban Statis

Secara umum, beban bergantung pada tegangan bus. Ketergantungan tegangan beban statis dapat dinyatakan melalui persamaan polinomial atau eksponensial. Pemodelan beban statis umumnya dinyatakan sebagai fungsi besarnya tegangan pada bus tertentu yang terhubung ke beban sebagai [57],

$$P_{Li}(V_i) = P_{Li}^0 \left[\alpha_P \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 + \beta_P \left(\frac{V_i}{V_0} \right) + \gamma_P \right] \quad (7)$$

$$Q_{Li}(V_i) = Q_{Li}^0 \left[\alpha_Q \left(\frac{V_i}{V_0} \right)^2 + \beta_Q \left(\frac{V_i}{V_0} \right) + \gamma_Q \right] \quad (8)$$

3.2.2 Pemodelan Beban Dinamis

Pemodelan beban dinamis sangat penting untuk strategi pelepasan beban, karena motor induksi akan sangat melambat jika tegangan terminalnya menurun karena korsleting. Model umum untuk beban dinamis adalah [58],

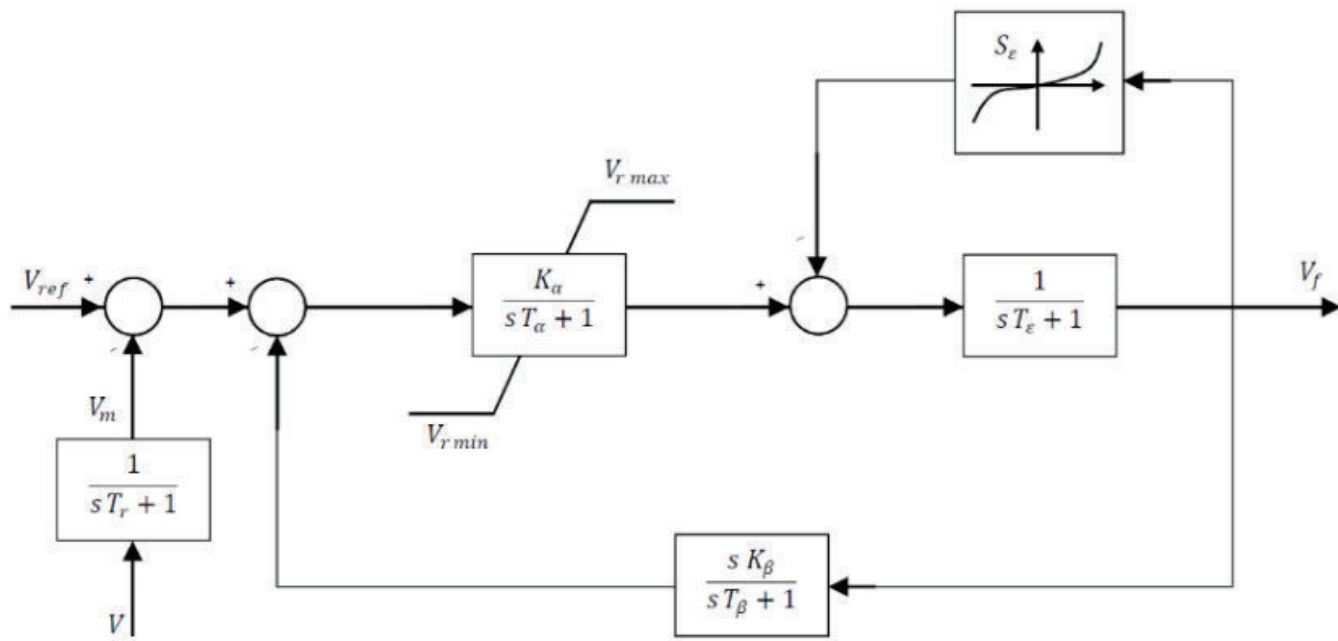
$$T_p \frac{dP_d}{dt} + V^{\alpha_t} P_d = V^{\alpha_t} P_s(V) + \alpha_t T_p \frac{P_d}{V} \frac{dV}{dt} \quad (9)$$

$$T_q \frac{dQ_d}{dt} + V^{\beta_t} Q_d = V^{\beta_t} Q_s(V) + \beta_t T_q \frac{Q_d}{V} \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

Dimana α_t , α_s , β_t , β_s , P_1 dan Q_1 adalah konstanta independen dari tegangan beban busbar V .

3.3 PEMODELAN REGULATOR TEGANGAN OTOMATIS

Generator modern telah dipersiapkan dengan sebuah regulator tegangan otomatis (*automatic voltage regulator* - AVR). Sebuah AVR menjaga regulasi tegangan utama dari generator dan berfungsi untuk mempertahankan tegangan terminal konstan dan untuk memantau output daya reaktif [59]. Sebuah AVR juga meningkatkan margin kestabilan pembangkit. Dalam penelitian ini, model sistem eksitasi AVR IEEE Tipe 1 standar yang digunakan seperti yang diperlihatkan Gambar 3 [60].



Gambar 3 Model sistem eksitasi AVR IEEE Tipe 1 standar [60]

3.4 SISTEM KONTROL DFIG

Konfigurasi khas dari teknologi PLTB berbasis turbin angin DFIG ditunjukkan secara skematis pada Gambar 4. Karena fluks dinamis stator dan rotor lebih cepat dibandingkan fluks dinamis jaringan dan sistem kontrol konverter memisahkan generator dari *grid*, sehingga persamaan kelistrikan *steady-state* dari DFIG adalah [55]:

$$v_{ds} = -r_S i_{ds} + [(x_S + x_m)i_{qs} + x_m i_{qr}] \quad (11)$$

$$v_{qs} = -r_S i_{qs} - [(x_S + x_m)i_{ds} + x_m i_{dr}] \quad (12)$$

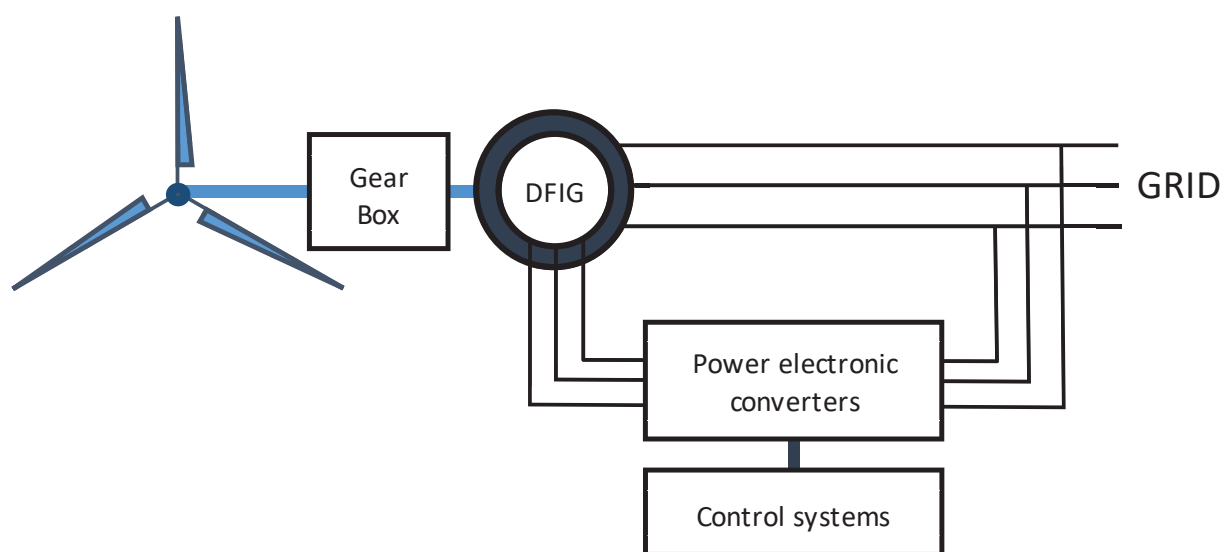
$$v_{dr} = -r_R i_{dr} + (1 - \omega_m)[(x_R + x_m)i_{qr} + x_m i_{qs}] \quad (13)$$

$$v_{qr} = -r_R i_{dr} - (1 - \omega_m)[(x_R + x_m)i_{dr} + x_m i_{ds}] \quad (14)$$

Kemudian, daya aktif dan reaktif yang dikirim ke jaringan menjadi:

$$P = v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs} + v_{dc} i_{dc} + v_{qc} i_{qc} \quad (15)$$

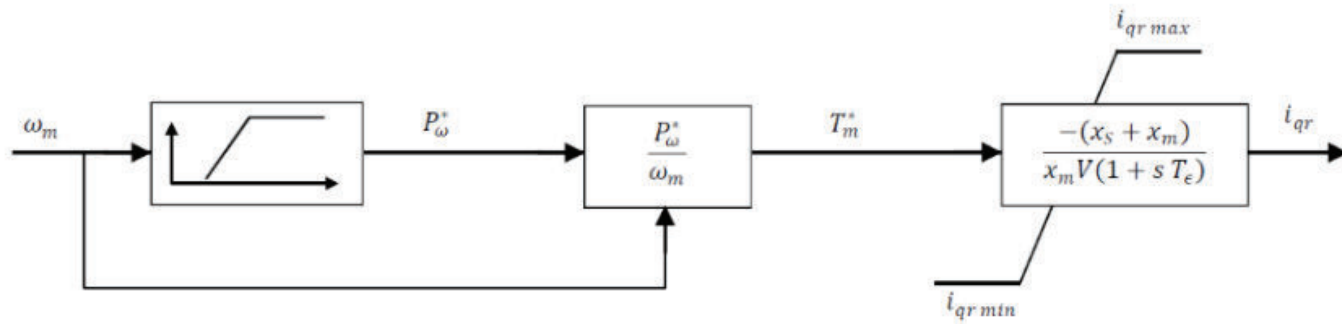
$$Q = v_{qs} i_{qs} - v_{ds} i_{ds} + v_{qc} i_{qc} - v_{dc} i_{dc} \quad (16)$$



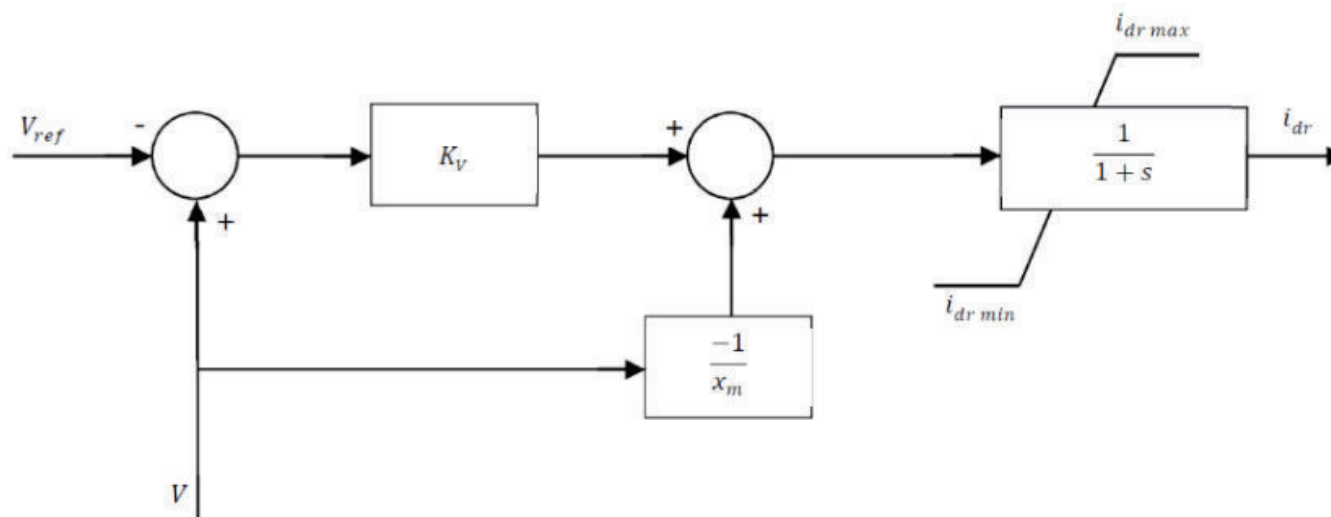
Gambar 4 Konfigurasi teknologi turbin angin DFIG

Karena dinamis konverter lebih cepat dibandingkan dengan transien elektromekanis, konverter disederhanakan dan dimodelkan sebagai sumber arus ideal di mana i_{qr} dan i_{dr} merupakan variabel keadaan. i_{qr} digunakan untuk mengontrol kecepatan rotor, sedangkan i_{dr} digunakan untuk mengontrol tegangan. Skema sistem pengontrolan kecepatan rotor DFIG dapat dilihat pada Gambar 5

dan skema pengontrolan tegangan DFIG diberikan pada Gambar 6.



Gambar 5 Skema sistem pengontrolan kecepatan rotor DFIG [55]



Gambar 6 Skema sistem pengontrolan tegangan DFIG [55]

Persamaan diferensial untuk arus konverter dapat ditulis sebagai:

$$i_{qr} = \left[-\frac{x_s + x_m}{x_m V} \frac{P_{\omega}^*(\omega_m)}{\omega_m} - i_{qr} \right] \frac{1}{T_{\epsilon}} \quad (17)$$

$$i_{dr} = K_V (V - V_{ref}) - \frac{V}{x_m} - i_{dr} \quad (18)$$

$P_{\omega}^*(\omega_m)$ adalah karakteristik kecepatan-daya yang mengoptimalkan penangkapan energi angin dan dihitung menggunakan nilai kecepatan rotor.

DESAIN PELEPASAN BEBAN DENGAN SENSITIVITAS LINTASAN

4.1 ANALISIS KESTABILAN TEGANGAN DINAMIS

Analisis kestabilan tegangan dinamis adalah metode konstruktif untuk menganalisis keadaan *voltage collapse* tertentu dan menyelidiki koordinasi tindakan proteksi dan kontrol yang bergantung pada waktu. Analisis kestabilan tegangan dinamis menggunakan simulasi domain waktu untuk menyajikan penjelasan tentang persamaan diferensial sistem nonlinier. Analisis kestabilan tegangan dinamis sangat penting untuk menilai kinerja sistem, untuk mengontrol desain sistem dan untuk mengembangkan metode untuk mencegah *voltage collapse*. Pemodelan sistem tenaga dan simulasi domain waktu yang tepat dapat menggambarkan peristiwa waktu dan kronologinya hingga fase akhir *voltage collapse*.

4.2 ANALISIS SENSITIVITAS DAYA AKTIF - TEGANGAN DINAMIS

Analisis sensitivitas lintasan adalah teknik yang didasarkan pada linierisasi sistem yang mengelilingi lintasan tertentu dan menggunakan simulasi domain waktu [61]. Teknik ini menghitung sensitivitas dinamika yang berkaitan dengan kendala [62]. Sensitivitas lintasan menyediakan metode untuk menghitung perubahan dalam variabel sistem sehubungan dengan perubahan cepat parameter sistem dan kondisi awal [63]. Metodologi dasar perhitungan sensitivitas lintasan sistem hybrid diilustrasikan dalam [63] dan dijelaskan sebagai berikut.

Representasi sistematis dari sistem tenaga yang berlaku untuk studi kestabilan tegangan disediakan oleh persamaan aljabar diferensial berikut:

$$\dot{x} = f(x, y; \alpha) \quad (19)$$

$$0 = g(x, y; \alpha) \quad (20)$$

x adalah vektor yang variabel keadaan yang dinamis; y adalah vektor dari yang variabel keadaan aljabar seperti besaran tegangan beban bus dan sudut; dan α mewakili parameter sistem, seperti daya di bus.

Lintasan dari Persamaan (19) dan (20) menggambarkan kinerja variabel dinamis x dan variabel aljabar y , di mana aliran x dan y dapat didefinisikan, sebagai:

$$x(t) = \varphi_x(x_0, t, \alpha) \quad (21)$$

$$y(t) = \varphi_y(y_0, t, \alpha) \quad (22)$$

Sensitivitas aliran φ_x dan φ_y ke kondisi awal dan variasi parameter dapat diperoleh dengan membentuk ekspansi deret Taylor dari persamaan di atas, maka:

$$\begin{aligned} \Delta x(t) &= \Delta \varphi_x(x_0, t, \alpha) = \frac{\partial \varphi_x(x_0, t, \alpha)}{\partial \alpha} \Delta \alpha \\ &= \frac{\partial x(t)}{\partial \alpha} \Delta \alpha \cong x_\alpha(t) \Delta \alpha \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \Delta y(t) &= \Delta \varphi_y(y_0, t, \alpha) = \frac{\partial \varphi_y(y_0, t, \alpha)}{\partial \alpha} \Delta \alpha \\ &= \frac{\partial y(t)}{\partial \alpha} \Delta \alpha \cong y_\alpha(t) \Delta \alpha \end{aligned} \quad (24)$$

Metode numerik berbasis perkiraan digunakan untuk menghitung sensitivitas x_α dan y_α , sehingga:

$$\begin{aligned} x_\alpha &= \frac{\partial x}{\partial \alpha} = \frac{\Delta x}{\Delta \alpha} \\ &\approx \frac{\varphi_x(x_0, t, \alpha + \Delta \alpha) - \varphi_x(x_0, t, \alpha)}{\Delta \alpha} \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} y_\alpha &= \frac{\partial y}{\partial \alpha} = \frac{\Delta y}{\Delta \alpha} \\ &\approx \frac{\varphi_y(y_0, t, \alpha + \Delta \alpha) - \varphi_y(y_0, t, \alpha)}{\Delta \alpha} \end{aligned} \quad (26)$$

Sensitivitas lintasan dari Persamaan (24) dan (26) dimodifikasi untuk memenuhi tujuan penelitian ini. Besarnya tegangan bus diwakili oleh y dan jumlah pelepasan beban adalah parameter yang diwakili oleh α ; maka, sensitivitas dari variasi tegangan bus setelah pelepasan beban pada setiap bus yang ditentukan dihitung dan dapat didefinisikan sebagai:

$$\begin{aligned}\Delta V(t) &= \Delta \varphi_V(V_0, t, P) = \frac{\partial \varphi_V(V_0, t, P)}{\partial P} \Delta P \\ &= \frac{\partial V(t)}{\partial P} \Delta P \cong V_P(t) \Delta P\end{aligned}\quad (27)$$

$$\begin{aligned}\varphi V_P &= \frac{\partial V}{\partial P} = \frac{\Delta V}{\Delta P} \\ &\approx \frac{\varphi_V(V_0, t, P + \Delta P) - \varphi_V(V_0, t, P)}{\Delta P}\end{aligned}\quad (28)$$

4.3 FAKTOR SENSITIVITAS LINTASAN (FSL)

Selain itu, sensitivitas lintasan dilakukan untuk menemukan lokasi pelepasan beban. Faktor sensitivitas lintasan diformulasikan untuk menilai kontribusi bus j setelah pelepasan beban terhadap kestabilan tegangan sistem. Sensitivitas yang dihitung adalah $[\partial V_i / \partial P_j]$, yang menginformasikan laju perubahan besarnya tegangan pada bus i sehubungan dengan variasi jumlah pelepasan beban

di bus j . FSL di bus j dihitung dengan melepaskan daya aktif di bus j dengan nilai kecil, kemudian menilai dampaknya pada besaran tegangan pada bus-bus yang kritis dengan menggunakan domain waktu. FSL yang diusulkan dalam tulisan ini didefinisikan sebagai:

$$FSL_j = FSL_j^{beban} + FSL_j^{PLTB} \quad (29)$$

$$FSL_j^{beban} = \sum_{i=1}^{n_k} \left[\sum_{t=0}^{t_s} \left[\frac{\partial V_i^{beban}}{\partial P_j} \right]_{t=t_k} \right] \quad (30)$$

$$FSL_j^{PLTB} = \sum_{i=1}^{n_{PLTB}} \left[\sum_{t=0}^{t_s} \left[\frac{\partial V_i^{PLTB}}{\partial P_j} \right]_{t=t_k} \right] \quad (31)$$

$$\partial P_j = \Delta P_j = P_{shed_j}$$

Ada dua komponen yang dihitung di sini, yaitu FSL_j^{beban} dan FSL_j^{PLTB} . FSL_j^{beban} mengevaluasi sensitivitas tegangan lintasan di bus beban kritis terhadap ke besarnya pelepasan beban di bus j , sedangkan FSL_j^{PLTB} menilai sensitivitas tegangan di dalam bus PLTB sehubungan dengan pelepasan beban di bus j . Bus dengan FSL tertinggi memiliki efek terbesar pada peningkatan kestabilan tegangan bus kritis dan karenanya akan dipilih sebagai kandidat bus sebagai lokasi pelepasan beban. Diagram alir yang diusulkan untuk skema pelepasan beban berbasis sensitivitas lintasan ditunjukkan pada

Gambar 7 sedangkan prosedur komputasi dijelaskan secara rinci di bawah ini:

- Langkah 1* Perhitungan kuantitas pelepasan beban. Pada penelitian ini besaran pelepasan beban diatur sebesar 1% dari total beban untuk setiap iterasi.
- Langkah 2* Penentuan satu set kontingensi yang telah ditentukan, lalu pilih gangguan.
- Langkah 3* Eksekusi analisis kestabilan tegangan dinamis atau analisis simulasi domain waktu untuk mengamati perilaku tegangan untuk semua bus jika terjadi keadaan yang tidak terduga. Pada tahap ini, pemulihan tegangan pasca-gangguan pada semua bus diperiksa apakah berada dalam batas kestabilan. Jika demikian, proses dihentikan. Jika tidak, ini menunjukkan bahwa sistem membutuhkan pelepasan beban untuk menghindari kemungkinan *voltage drop*, lalu lanjutkan ke *Langkah 4*.
- Langkah 4* Identifikasi bus dan daerah kritis. Daerah kritis adalah daerah yang mengalami penurunan tegangan di bawah batas kestabilan dan memiliki lintasan penurunan tegangan yang sama.

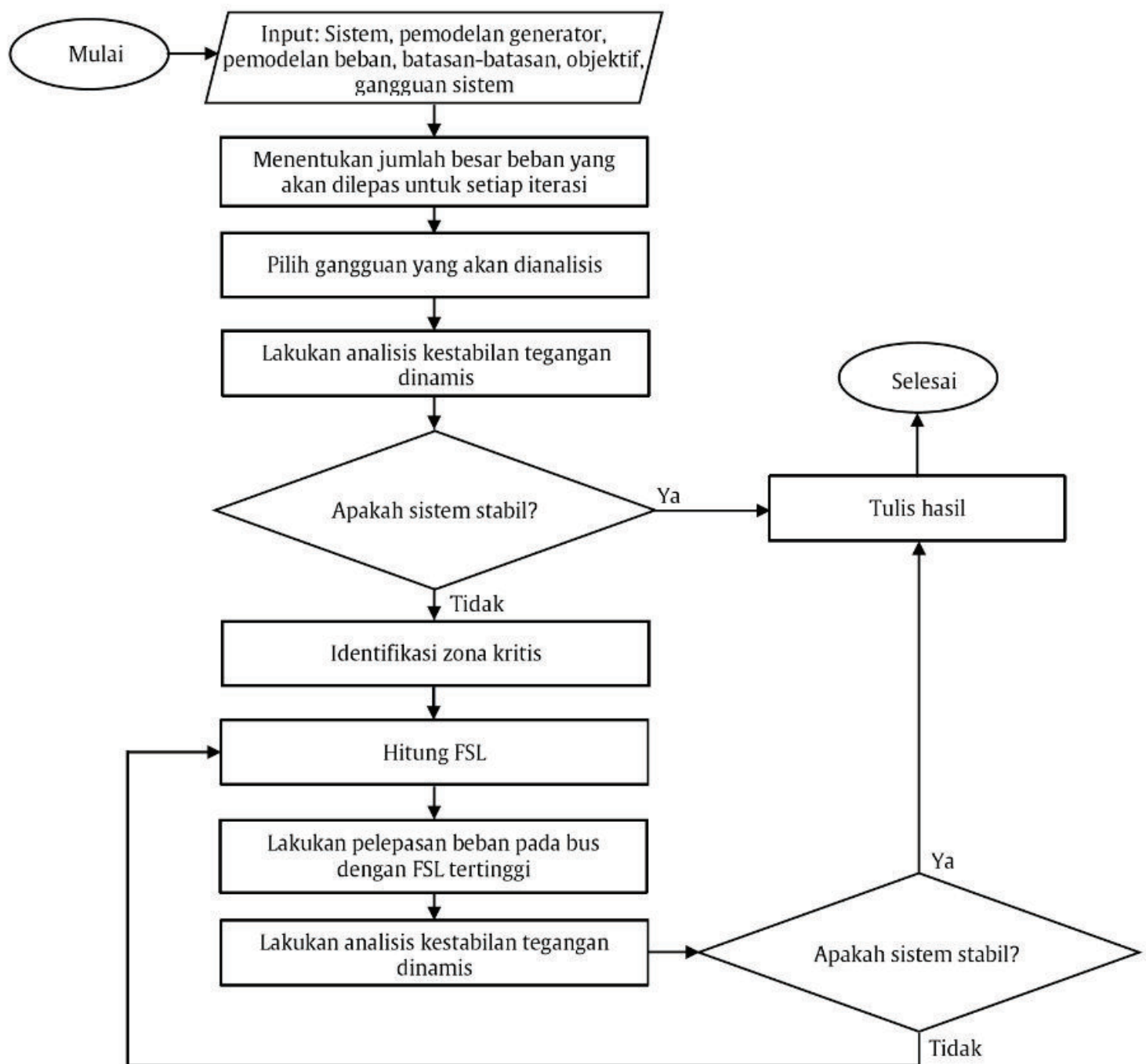
Langkah 5 Perhitungan FSL_j menggunakan Persamaan (29) untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing bus beban dan/atau bus PLTB dalam pemulihan kestabilan tegangan bus di dalam area kritis dengan kuantitas pelepasan beban 1% dari total beban. Bus dengan FSL_j tertinggi berarti bus ini merupakan bus yang paling sensitif sehingga berpengaruh besar terhadap peningkatan besar tegangan dengan jumlah pelepasan beban yang kecil. Lokasi pelepasan beban ditentukan berdasarkan nilai FSL_j tertinggi.

Langkah 6 Penerapan pelepasan beban pada bus yang ditunjuk dengan FSL_j tertinggi.

Langkah 7 Eksekusi analisis kestabilan tegangan dinamis untuk menilai operasi sistem setelah pelepasan beban. Pada titik ini, pemeriksaan lebih lanjut dilakukan untuk mengidentifikasi apakah kinerja pemulihan tegangan pasca gangguan pada semua bus beban setelah pelepasan beban memenuhi batasan kestabilan tegangan. Jika ya, alur kerja berlanjut ke *Langkah 8* untuk menyimpulkan proses dan menulis hasilnya. Jika tidak, ini menunjukkan jumlah pelepasan beban yang dibutuhkan lebih banyak, maka

kerangka kerja beralih ke *Langkah 5*.

Langkah 8 Selesaikan proses skema pelepasan beban dinamis, tulis hasilnya dan hentikan prosesnya.



Gambar 7 Flowchart skema pelepasan beban yang diusulkan

4.4 BATASAN KESTABILAN, TUJUAN OPTIMASI, DAN MARGIN KESTABILAN TEGANGAN

Untuk memenuhi kriteria kestabilan tegangan, batasan kestabilan tegangan berikut digunakan:

$$0.9 \leq V_{(t_{k+N})} \leq 1.1 \quad (32)$$

Selanjutnya, tujuan optimasi sensitivitas kurva dinamis pelepasan beban adalah untuk menentukan jumlah pelepasan beban minimum untuk memastikan kendala tegangan terpenuhi, yaitu

$$\min \sum_{j=i}^m P_{shed_j} \quad (33)$$

di mana m adalah jumlah lokasi pelepasan beban.

Margin kestabilan tegangan atau *Voltage Stability Margin* (VSM) dihitung dengan menggunakan metode kurva PV [5]. VSM dinyatakan sebagai pertambahan beban total pada daerah penambahan beban yang dihitung dari keadaan dasar sampai perpindahan daya maksimum (titik hidung kurva PV) yang dinyatakan dalam MW atau persentase. VSM dapat dihitung dengan persamaan ini

$$VSM (\%) = \frac{\lambda_k^{max} - \lambda_{base}}{\lambda_k^{max}} \times 100\% \quad (34)$$

di mana λ_{base} adalah parameter pembebanan dasar untuk operasi kasus dasar dan λ_k^{max} merupakan parameter pembebanan maksimum untuk keadaan tertentu.

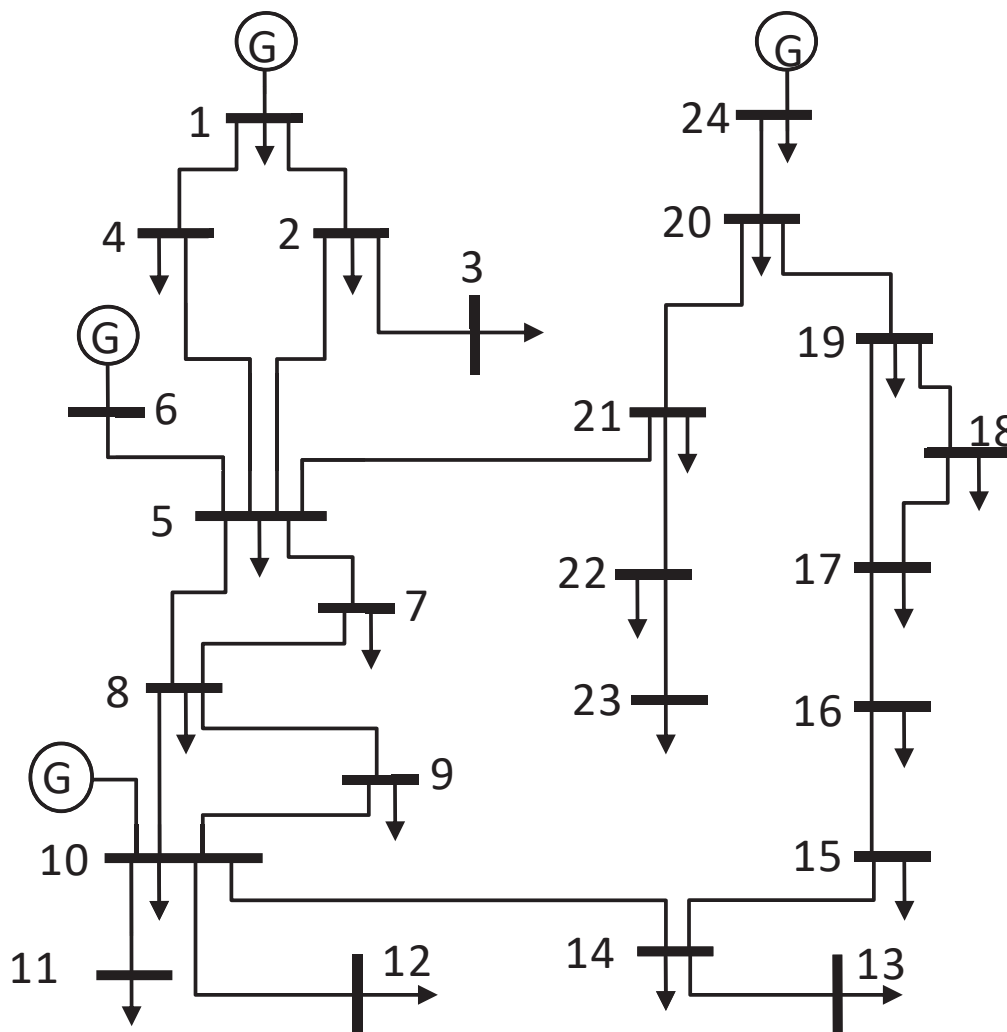
IMPLEMENTASI DAN EVALUASI SKEMA PELEPASAN BEBAN BERBASIS SIMULASI DOMAIN WAKTU

5.1 SISTEM UJI: SISTEM TENAGA LISTRIK SULAWESI SELATAN

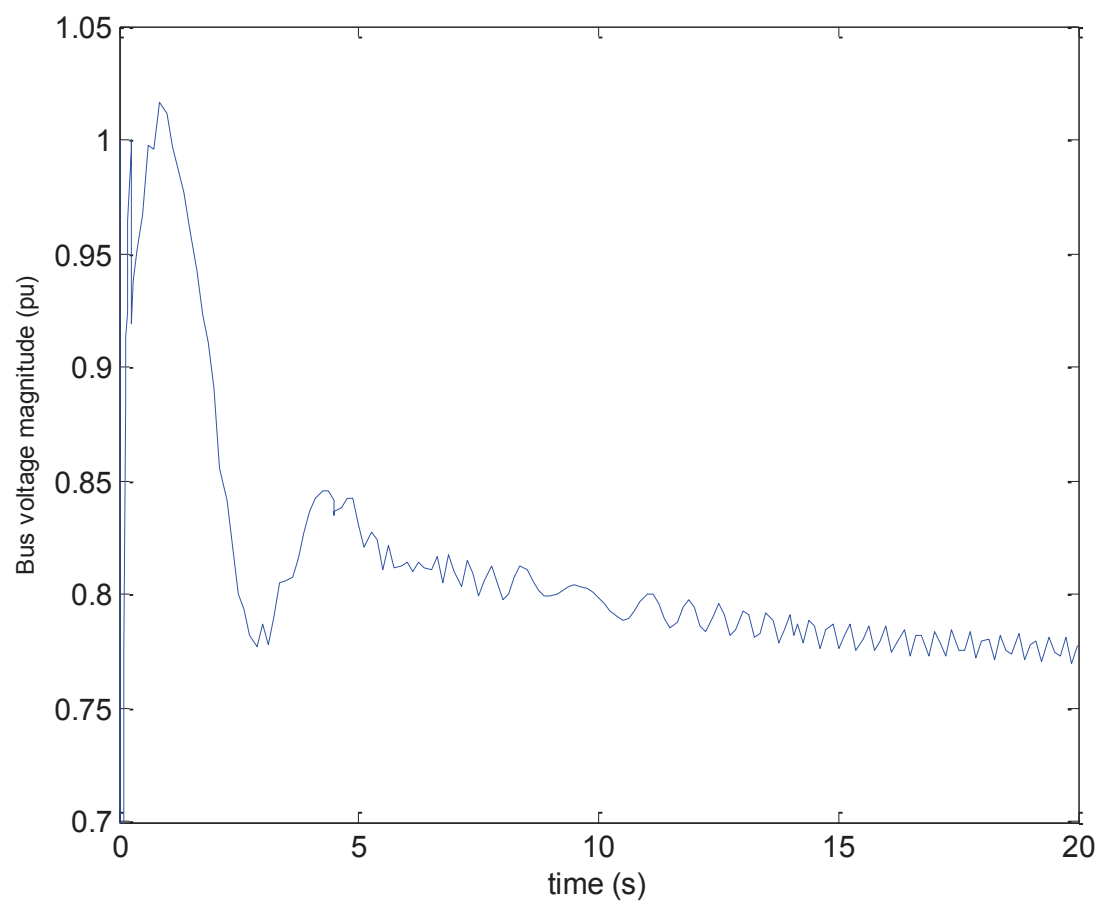
5.1.1 Gambaran Umum Sistem Studi [64]

Sistem tenaga listrik interkoneksi Sulawesi Selatan terdiri dari berbagai pembangkit yang saling terhubung oleh beberapa saluran transmisi tegangan tinggi dengan ibukota provinsi Kota Makassar. Sistem Sulawesi Selatan memiliki ciri khas di mana pembangkit listrik utama yang hemat biaya terletak di utara sistem, sedangkan pusat beban utama terletak di selatan.

Sebagai pusat pemerintahan provinsi dan bisnis, beban di Kota Makassar (yang merupakan ibu kota provinsi Sulawesi Selatan, pusat bisnis Indonesia bagian timur yang diwakili oleh bus 10, 11, 12, dan 13) didominasi oleh beban dinamis yang umumnya beban pendingin udara dan pompa air. Selain itu, ada dua industri semen besar yang terhubung ke bus 8. Gambar 8 memperlihatkan diagram satu garis dari sistem studi kasus.



Gambar 8 Diagram garis tunggal studi kasus [64]



Gambar 38 Penurunan tegangan di bus PLTB setelah pelepasan beban di bus 3



BAB VI

KESIMPULAN

Penelitian ini merekomendasikan desain pelepasan beban akibat penurunan tegangan (*under-voltage load shedding*) untuk menstabilkan sistem setelah gangguan besar dan untuk memastikan batasan keamanan sistem terpenuhi. Skema pelepasan beban dirancang berdasarkan metode sensitivitas dinamis yang menghitung sensitivitas dinamika yang terkait dengan kendala sistem dan merancang teknik penghitungan variasi variabel sistem sehubungan dengan perubahan cepat dalam parameter sistem dan kondisi awal. Dalam penelitian ini, sensitivitas dinamis digunakan untuk memverifikasi jumlah pelepasan beban minimum dan untuk menentukan lokasi pelepasan beban.

Metode ini diimplementasikan pada sistem Sulawesi Selatan di Indonesia dan Sistem IEEE 14 Bus sebagai sistem uji. Untuk Sistem Sulawesi Selatan, dua kasus dipelajari, yaitu gangguan pertama

antara bus 8 dan 10 dan kasus kedua gangguan antara bus 17 dan 19. Perhitungan faktor sensitivitas lintasan telah menunjukkan bus yang berbeda sebagai lokasi pelepasan beban. Hasil simulasi dinamis serta perhitungan margin kestabilan tegangan mengkonfirmasi efektifitas metode yang diusulkan. Faktor sensitivitas lintasan memberikan informasi yang mudah untuk menemukan lokasi yang paling tepat untuk pelepasan beban. Akhirnya, perlu dijelaskan bahwa metodologi yang diusulkan terdiri dari teknik umum yang dapat diterapkan dalam merancang pendekatan yang lebih realistis, andal, dan efektif untuk pelepasan beban dinamis dengan mempertimbangkan pemodelan beban untuk sistem tenaga listrik dimanapun.

Pada sistem uji kedua, Sistem IEEE 14 Bus, penelitian ini mensimulasikan perilaku sistem setelah terjadinya gangguan dengan dan tanpa PLTB. Dari simulasi, terlihat bahwa adanya PLTB membantu manajemen sisi beban dalam situasi kritis dengan mengurangi jumlah beban yang harus dilepas dari sistem. Sebelum adanya PLTB, jumlah beban yang dilepas adalah 30 MW; sedangkan, ketika PLTB terhubung ke bus 14 dengan sebuah daya total gabungan 10 MW, jumlah beban yang dilepaskan setelah gangguan yang sama hanya 15 MW.

Satu masalah dengan integrasi PLTB adalah daya asinkron yang muncul setelah gangguan. Penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk

menganalisis masalah ini dan menyelidiki bagaimana meningkatkan kinerja pelepasan beban untuk mengurangi daya asinkron ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Z. Y. Dong and P. Zhang, *Emerging Techniques in Power System Analysis*: Springer, 2009.
- [2] Z. Shi, W. Yao, Z. Li, L. Zeng, Y. Zhao, R. Zhang, *et al.*, "Artificial intelligence techniques for stability analysis and control in smart grids: Methodologies, applications, challenges and future directions," *Applied Energy*, vol. 278, p. 115733, 2020.
- [3] H. Liu, B. Wang, N. Wang, Q. Wu, Y. Yang, H. Wei, *et al.*, "Enabling strategies of electric vehicles for under frequency load shedding," *Applied Energy*, vol. 228, pp. 843-851, 2018.
- [4] T. S. P. Fernandes, J. R. Lenzi, and M. A. Mikilita, "Load Shedding Strategies Using Optimal Load Flow With Relaxation of Restrictions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 712-718, 2008.
- [5] C. M. Affonso, L. C. P. da Silva, F. G. M. Lima, and S. Soares, "MW and MVar Management on Supply and Demand Side for Meeting Voltage Stability Margin Criteria," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 19, pp. 1538-1545, 2004.
- [6] Y. Wang, I. R. Pordanjani, W. Li, W. Xu, and E. Vaahedi, "Strategy to minimise the load shedding amount for voltage collapse prevention," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 5, pp. 307-313, 2011.

- [7] A. Ahmadi and Y. Alinejad-Beromi, "A new integer-value modeling of optimal load shedding to prevent voltage instability," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 65, pp. 210-219, 2015.
- [8] M. M. Hosseini-Bioki, M. Rashidinejad, and A. Abdollahi, "An implementation of particle swarm optimization to evaluate optimal under-voltage load shedding in competitive electricity markets," *Journal of Power Sources*, vol. 242, pp. 122-131, 2013.
- [9] L. D. Arya and A. Koshti, "Anticipatory load shedding for line overload alleviation using Teaching learning based optimization (TLBO)," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 63, pp. 862-877, 2014.
- [10] F. Capitanescu, "Enhanced risk-based SCOPF formulation balancing operation cost and expected voluntary load shedding," *Electric Power Systems Research*, vol. 128, pp. 151-155, 2015.
- [11] D. Chattopadhyay and B. B. Chakrabarti, "A preventive/corrective model for voltage stability incorporating dynamic load-shedding," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, pp. 363-376, 2003.
- [12] X. Fu and X. Wang, "Determination of load shedding to provide voltage stability," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 515-521, 2011.
- [13] M. El-Shimy, "Stability-based minimization of load shedding in weakly interconnected

- systems for real-time applications," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 70, pp. 99-107, 2015.
- [14] Z. A. Hamid and I. Musirin, "Optimal Fuzzy Inference System incorporated with stability index tracing: An application for effective load shedding," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, pp. 1095-1103, 2014.
- [15] M. Moazzami, M. J. Morshed, and A. Fekih, "A new optimal unified power flow controller placement and load shedding coordination approach using the Hybrid Imperialist Competitive Algorithm-Pattern Search method for voltage collapse prevention in power system," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 79, pp. 263-274, 2016.
- [16] V. Tamilselvan and T. Jayabarathi, "A hybrid method for optimal load shedding and improving voltage stability," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 7, pp. 223-232, 2016.
- [17] T. Amraee, A. M. Ranjbar, and R. Feuillet, "Adaptive under-voltage load shedding scheme using model predictive control," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, pp. 1507-1513, 2011.
- [18] H. Atighechi, P. Hu, S. Ebrahimi, J. Lu, G. Wang, and L. Wang, "An effective load shedding remedial action scheme considering wind farms generation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 95, pp. 353-363, 2018.

- [19] A. Estebasari, E. Pons, T. Huang, and E. Bompard, "Techno-economic impacts of automatic undervoltage load shedding under emergency," *Electric Power Systems Research*, vol. 131, pp. 168-177, 2016.
- [20] A. Mahari and H. Seyedi, "A wide area synchrophasor-based load shedding scheme to prevent voltage collapse," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 248-257, 2016.
- [21] B. Sapkota and V. Vittal, "Dynamic VAR Planning in a Large Power System Using Trajectory Sensitivities," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 461-469, 2010.
- [22] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, "Standard Load Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, pp. 1302-1313, 1995.
- [23] T. Aziz, N.-A. Masood, S. R. Deeba, W. Tushar, and C. Yuen, "A methodology to prevent cascading contingencies using BESS in a renewable integrated microgrid," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 110, pp. 737-746, 2019.
- [24] B. H. Lee and K. Y. Lee, "Dynamic and static voltage stability enhancement of power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 8, pp. 231-238, 1993.
- [25] D. Lefebvre, S. Bernard, and T. Van Cutsem, "Undervoltage Load Shedding Scheme for the Hydro-Quebec System," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*,

- Denver, Colorado, USA, 6-10 June, 2004, pp. 1619-1624 Vol.2.
- [26] P. Kundur, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [27] D. Andersson, P. Elmersson, A. Juntti, Z. Gajic, D. Karlsson, and L. Fabiano, "Intelligent Load Shedding to Counteract Power System Instability," in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America*, 2004, pp. 570-574.
- [28] R. M. Rifaat, "On Composite Load Modeling for Voltage Stability and Under Voltage Load Shedding," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Denver, Colorado, USA, June 7 - 10, 2004, pp. 1603-1610 Vol.2.
- [29] C. J. Mozina, "Undervoltage Load Shedding," in *60th Annual Conference for Protective Relay Engineers* Texas, USA, 27-29 March, 2007, pp. 16-34.
- [30] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*. New York: McGraw Hill, 1994.
- [31] C. W. Taylor, "Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, pp. 480-488, 1992.
- [32] S. Imai, "Undervoltage Load Shedding Improving Security as Reasonable Measure for Extreme Contingencies," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, San Francisco, California, USA, 12-16 June, 2005, pp. 1754-1759, vol. 2.
- [33] M. Begovic, D. Fulton, M. R. Gonzalez, J. Goossens, E. A. Guro, R. W. Haas, *et al.*,

- "Summary of "System Protection and Voltage Stability"," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, pp. 631-638, 1995.
- [34] S. S. Ladhani and W. Rosehart, "Under Voltage Load Shedding for Voltage Stability Overview of Concepts and Principles," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Denver, Colorado, USA, 6-10 June, 2004, pp. 1597-1602, vol. 2.
- [35] D. Chen and R. R. Mohler, "Neural-Network-Based Load Modeling and Its Use in Voltage Stability Analysis," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 11, pp. 460-470, 2003.
- [36] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters supplying an isolated load from a variable speed wind turbine," *IEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 143, pp. 380-387, 1996.
- [37] N. Heng, S. Yipeng, Z. Peng, and H. Yikang, "Improved Direct Power Control of a Wind Turbine Driven Doubly Fed Induction Generator During Transient Grid Voltage Unbalance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, pp. 976-986, 2011.
- [38] E. Vittal, M. O'Malley, and A. Keane, "A Steady-State Voltage Stability Analysis of Power Systems With High Penetrations of Wind," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, pp. 433-442, 2010.
- [39] V. Akhmatov and P. B. Eriksen, "A Large Wind Power System in Almost Island Operation; A Danish Case Study," *IEEE*

- Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 937-943, 2007.
- [40] M. H. Ali and W. Bin, "Comparison of Stabilization Methods for Fixed-Speed Wind Generator Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 323-331, 2010.
- [41] C. Chompoonwai, C. Yingvivatanapong, K. Methaprayoon, and L. Wei-Jen, "Reactive Compensation Techniques to Improve the Ride-Through Capability of Wind Turbine During Disturbance," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, pp. 666-672, 2005.
- [42] M. J. Hossain, H. R. Pota, M. A. Mahmud, and R. A. Ramos, "Investigation of the Impacts of Large-Scale Wind Power Penetration on the Angle and Voltage Stability of Power Systems," *IEEE Systems Journal*, vol. PP, pp. 1-1, 2011.
- [43] H. T. Le, S. Santoso, and T. Q. Nguyen, "Augmenting Wind Power Penetration and Grid Voltage Stability Limits Using ESS: Application Design, Sizing, and a Case Study," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PP, pp. 1-1, 2011.
- [44] U. Nayeem Rahmat and T. Torbjrn, "Variable Speed Wind Turbines for Power System Stability Enhancement," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, pp. 52-60, 2007.
- [45] E. Vittal, M. O'Malley, and A. Keane, "Rotor Angle Stability With High Penetrations of Wind Generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PP, pp. 1-1, 2011.

- [46] W. Yi and X. Lie, "Coordinated Control of DFIG and FSIIG-Based Wind Farms Under Unbalanced Grid Conditions," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, pp. 367-377, 2010.
- [47] Z. Peng, H. Yikang, and S. Dan, "Improved Direct Power Control of a DFIG-Based Wind Turbine During Network Unbalance," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, pp. 2465-2474, 2009.
- [48] A. Arulampalam, M. Barnes, N. Jenkins, and J. B. Ekanayake, "Power Quality and Stability Improvement of a Wind Farm Using STATCOM Supported with Hybrid Battery Energy Storage," *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, pp. 701-710, 2006.
- [49] S. K. Salman and A. L. J. Teo, "Windmill Modelling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-Connected Wind Powerbased Embedded Generator," *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 18, pp. 793–802, 2003.
- [50] X. Ding and A. A. Girgis, "Optimal Load Shedding Strategy in Power Systems with Distributed Generation," in *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Columbus, Ohio, USA, January 28-31, 2001, pp. 788-793 vol.2.
- [51] I. Erlich, J. Kretschmann, J. Fortmann, S. Mueller-Engelhardt, and H. Wrede, "Modeling of Wind Turbines Based on Doubly-Fed Induction Generators for Power

- System Stability Studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, pp. 909-919, 2007.
- [52] T. Weckesser, H. Jóhannsson, and J. Østergaard, "Impact of model detail of synchronous machines on real-time transient stability assessment," in *2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid*, 2013, pp. 1-9.
- [53] P. W. Sauer and M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*. Champaign, Illinois, USA: Stipes Publishing L.L.C, 2006.
- [54] D. L. H. Aik and G. Andersson, "Quasi-static Stability of HVDC Systems Considering Dynamic Effects of Synchronous Machines and Excitation Voltage Control," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, pp. 1501-1514, 2006.
- [55] F. Milano, *Power System Analysis Toolbox*, 2005.
- [56] J. Ma, D. Han, R. He, Z. Dong, and D. J. Hill, "Reducing Identified Parameters of Measurement-Based Composite Load Model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 76-83, 2008.
- [57] W. W. Price, "Power System Dynamic Modeling," in *Power System Stability and Control*, L. L. Grigsby, Ed., ed Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2007.
- [58] B. Hua and V. Ajjarapu, "A Novel Online Load Shedding Strategy for Mitigating Fault-Induced Delayed Voltage Recovery," *IEEE*

- Transactions on Power Systems*, vol. 26, pp. 294-304, 2011.
- [59] J. B. X. Devotta, "A Dynamic Model of the Synchronous Generator Excitation Control System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. IE-34, pp. 429-432, 1987.
- [60] IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power System Stability Studies," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, pp. 494-509, 1981.
- [61] K. N. Shubhanga and A. M. Kulkarni, "Determination of Effectiveness of Transient Stability Controls Using Reduced Number of Trajectory Sensitivity Computations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 473-482, 2004.
- [62] J. Ma, D. Han, R.-M. He, Z.-Y. Dong, and D. J. Hill, "Reducing Identified Parameters of Measurement-Based Composite Load Model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, pp. 76-83, 2008.
- [63] I. A. Hiskens and M. A. Pai, "Trajectory Sensitivity Analysis of Hybrid Systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, vol. 47, pp. 204-220, 2000.
- [64] PT. PLN (Persero) AP2B Sistem Sulawesi Selatan, *Kondisi Kelistrikan Sistem Sulawesi Selatan dan Barat*. Makassar, Indonesia: PT. PLN (Persero) 2010.

PROFIL PENULIS



Ardiaty Arief mendapatkan gelar Sarjana Teknik di bidang teknik elektro dari Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia tahun 2001, gelar M.T.M. dari University of New South Wales, Sydney, Australia pada tahun 2004, dan gelar Ph.D. dalam kestabilan sistem tenaga listrik dari University of Queensland, Brisbane, Australia pada tahun 2013. Saat ini aktif sebagai dosen di Departemen Teknik Elektro dan peneliti di Pusat Penelitian Pengembangan Energi dan Ketenagalistrikan, Universitas Hasanuddin. Dr. Ardiaty Arief kini terlibat dalam kerjasama penelitian internasional dengan institusi Australia melalui program reliable, affordable, clean energy (RACE) for 2030 dan menjadi konsultan di Kursus Singkat Teknologi Energi Terbarukan untuk Indonesia Bagian Timur yang diadakan oleh Australia Award Indonesia pada 2019-2020, serta berpartisipasi pada Renewable Energy Workshop yang diadakan oleh ICED-USAID pada tahun 2016. Minat penelitian meliputi perencanaan sistem tenaga listrik, kestabilan dan keandalan sistem tenaga listrik, pemodelan beban serta komputasi kecerdasan buatan dan penerapannya dalam rekayasa sistem tenaga listrik.

PROFIL PENULIS



Ardiaty Arief mendapatkan gelar Sarjana Teknik di bidang teknik elektro dari Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia tahun 2001, gelar M.T.M. dari University of New South Wales, Sydney, Australia pada tahun 2004, dan gelar Ph.D. dalam kestabilan sistem tenaga listrik dari University of Queensland, Brisbane, Australia pada tahun 2013. Saat ini aktif sebagai dosen di Departemen Teknik Elektro dan peneliti di Pusat Penelitian Pengembangan Energi dan Ketenagalistrikan, Universitas Hasanuddin. Dr. Ardiaty Arief kini terlibat dalam kerjasama penelitian internasional dengan institusi Australia melalui program reliable, affordable, clean energy (RACE) for 2030 dan menjadi konsultan di Kursus Singkat Teknologi Energi Terbarukan untuk Indonesia Bagian Timur yang diadakan oleh Australia Award Indonesia pada 2019-2020, serta berpartisipasi pada Renewable Energy Workshop yang diadakan oleh ICED-USAID pada tahun 2016. Minat penelitian meliputi perencanaan sistem tenaga listrik, kestabilan dan keandalan sistem tenaga listrik, pemodelan beban serta komputasi kecerdasan buatan dan penerapannya dalam rekayasa sistem tenaga listrik.