



# Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Berbasis

REI-Dimo dan *Artificial  
Intelligence*

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

**Kestabilan Sistem Tenaga Listrik**  
**Berbasis REI-Dimo**  
**dan *Artificial Intelligence***

## 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).

Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., I.P.M.

# **Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Berbasis REI-Dimo dan *Artificial Intelligence***



*Cerdas, Bahagia, Mulia, Lintas Generasi.*

**KESTABILAN SISTEM TENAGA LISTRIK BERBASIS REI-DIMO DAN ARTTIFICIAL INTELLIGENCE**

**Indar Chaerah Gunadin**

Editor :

**Saly Nur Febriani**

Desain Cover :

**Rulie Gunadi**

Sumber :

www.shutterstock.com

Tata Letak :

**T. Yuliyanti**

Proofreader :

**Tiara Nabilah Azalia**

Ukuran :

**xviii, 187 hlm, Uk: 15.5x23 cm**

ISBN :

**978-623-02-6413-9**

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](http://www.deepublish.co.id)

[www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)

E-mail: [cs@deepublish.co.id](mailto: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 ***Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Berbasis REI-Dimo dan Artificial Intelligence***.

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada penulis, Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., I.P.M., 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**

## **KATA PENGANTAR**

Segala puji ke hadirat Allah Swt., yang atas rahmat dan hidayah-Nya telah membantu kami menyelesaikan buku ini dengan baik. Penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian buku ini. Untuk ibunda tercinta, Hj. Siti Haliah Opu Daeng Patawari atas dukungan dan doanya. Dan untuk ayahanda, Alm. M.S. Hasli, terima kasih atas didikan dan bimbingannya, semoga Allah membalas dengan melapangkan dan menerangi tempat peristirahatanmu, amin. Untuk istriku tercinta, dr. Sari Bulan, yang telah memberikan dukungan dan motivasi. Semoga Allah mencatat semua itu sebagai amal kebaikan dari istri yang berbakti kepada suaminya. Untuk buah hatiku, Fadiyah Tasya Putri Chaerah, Fakhirah Nabila Putri Chaerah, dan Fathur Iman Chaerah Hasli, yang telah menjadi penyemangat. Juga untuk rekan-rekan yang telah membantu dalam menyempurnakan buku ini.

Makassar, 18 November 2022

Penulis

# DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR PENERBIT .....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI .....	vii
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
<b>BAB I</b>	
<b>APA DAN MENGAPA STABILITAS DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK PENTING?.....</b>	<b>1</b>
1.1. Memahami Pentingnya Stabilitas dalam Sistem Tenaga Listrik.....	1
1.2. Esensi Mendalami Stabilitas dalam Sistem Tenaga Listrik.....	3
1.3. Arah Haluan Mendalami Stabilitas dalam Sistem Tenaga Listrik.....	3
1.4. Takrif Persoalan.....	4
1.5. Daya Guna Mendalami Stabilitas dalam Sistem Tenaga Listrik.....	4
1.6. Sistematika Buku .....	4
<b>BAB II</b>	
<b>DISKUSI WACANA DAN KONTEMPLASI PENELAAHAN.....</b>	<b>6</b>
2.1. Penelaahan <i>Steady State Stability</i> .....	6
2.2. Pentingnya Penentuan <i>Steady State Stability</i> <i>Limit</i> .....	7
2.3. Jarak ke Kondisi Tidak Stabil-Batas Aman .....	8
2.4. Konsep Dasar Stabilitas <i>Steady State</i> .....	8
2.5. Sistem Transmisi .....	11
2.5.1. Sistem <i>Single Load Infinite Bus</i> .....	11
2.6. Daya Maksimum yang Disalurkan .....	12

2.6.1.	Daya Maksimum yang Tidak Dibatasi .....	12
2.6.2.	Daya Maksimum untuk Kondisi Faktor Daya Diperhitungkan .....	14
2.6.3.	Rugi Transmisi yang Diabaikan .....	15
2.6.4.	Rugi Transmisi yang Diabaikan dan Faktor Daya Satu .....	15
2.6.5.	Daya Maksimum yang Disalurkan dari Persamaan Aliran Daya .....	16
2.7.	Beban Sistem Tenaga.....	17
2.7.1.	Model Beban Statis.....	17
2.8.	Model Transformator .....	19
2.9.	Model Current Limiter .....	21
2.10.	Modal Analysis .....	22
2.11.	Neural Network.....	25
2.11.1.	Fungsi Aktivasi.....	26
2.11.2.	Pola Koneksi Antar-Neuron (Arsitektur) .....	26
2.11.3.	Algoritma <i>Backpropagation</i> .....	27
2.12.	<i>Extreme Learning Machine</i> (ELM).....	29

### **BAB III TATA PROSES PENDALAMAN ..... 34**

3.1.	Informasi Sistem Tenaga .....	35
3.1.1.	Sistem IEEE 14 Bus .....	35
3.1.2.	Sistem Interkoneksi Jawa-Bali 500 kV.....	36
3.1.3.	Sistem Interkoneksi Sulseltrabar .....	39
3.2.	Tata Pelaksanaan Peninjauan .....	41
3.2.1.	Persamaan REI-Dimo <sup>[7]</sup> .....	43
3.2.2.	Radial Equivalent Independent (REI) Dimo .....	45
3.3.	Konsep Model Beban.....	48
3.3.1.	Model Polinomial (ZIP).....	50
3.3.2.	Model Eksponensial .....	50
3.3.3.	Model Eksponensial-Zip.....	50

3.4.	Tata Pelaksanaan Peninjauan Pengaruh Karakteristik Beban terhadap Fenomena <i>Voltage Collapse</i> .....	51
3.5.	Tata Pelaksanaan Pengaruh <i>Tap Changer, Load Characteristic</i> , dan <i>Current Limiter</i> pada <i>Steady State Stability</i> .....	52
3.6.	Tata Pelaksanaan <i>Steady State Stability Limit</i> Menggunakan <i>Artificial Neural Network (ANN)</i> untuk Sistem Jawa-Bali .....	53
3.6.1.	Algoritma <i>Neural Network</i> .....	54
3.7.	Tata Pelaksanaan Peninjauan Penentuan Batas <i>Steady State Stability</i> Menggunakan Kombinasi REI-Dimo dan <i>Extreme Learning Machine (ELM)</i> .....	57
3.7.1.	<i>Extreme Learning Machine</i> .....	58
3.8.	Tata Pelaksanaan Peninjauan <i>Steady State Stability</i> Menggunakan <i>Extereme Learning Machine</i> Berdasarkan <i>Strategi Modal Analysis</i> .....	59
3.9.	Tata Pelaksanaan Peninjauan <i>Active Power Rescheduling</i> untuk Meningkatkan Indeks Stabilitas <i>Steady State</i> .....	61
3.9.1.	Membentuk Matriks Z Thevenin.....	62

<b>BAB IV</b>	<b>PENGARUH KARAKTERISTIK BEBAN TERHADAP BATAS STABILITAS <i>STEADY STATE</i></b> .....	<b>68</b>
---------------	---	-----------

<b>BAB V</b>	<b>PENGARUH <i>TAP CHANGER, LOAD CHARACTERISTIC</i>, DAN <i>CURRENT LIMITER</i> TERHADAP STABILITAS <i>STEADY STATE</i></b> .....	<b>72</b>
--------------	---	-----------

<b>BAB VI</b>	<b>BATAS STABILITAS <i>STEADY STATE</i> MENGGUNAKAN <i>ARTIFICIAL NEURAL NETWORK (ANN)</i> UNTUK SISTEM JAWA-BALI</b> .....	<b>78</b>
6.1.	<i>REI-Dimo Equivalent</i> untuk Sistem Jawa-Bali 500 kV .....	79

<b>BAB VII</b>	<b>PENENTUAN BATAS STABILITAS <i>STEADY STATE</i> MENGGUNAKAN KOMBINASI REI-DIMO DAN <i>EXTREME LEARNING MACHINE (ELM)</i> .....</b>	<b>88</b>
<b>BAB VIII</b>	<b>STABILITAS <i>STEADY STATE</i> MENGGUNAKAN <i>EXTEREME LEARNING MACHINE</i> BERDASARKAN STRATEGI <i>MODAL ANALYSIS</i> .....</b>	<b>95</b>
<b>BAB IX</b>	<b><i>ACTIVE POWER RESCHEDULING</i> UNTUK MENINGKATKAN INDEKS STABILITAS <i>STEADY STATE</i> .....</b>	<b>107</b>
<b>BAB X</b>	<b>STABILITAS <i>STEADY STATE</i> PADA SISTEM SULSELBAR .....</b>	<b>116</b>
	10.1. <i>Load Flow</i> Sistem 44 Bus .....	116
	10.2. Perhitungan Rei-Dimo .....	121
	10.2.1. Perhitungan Admitansi Konstan .....	121
	10.2.2. Reduksi REI-Dimo .....	123
	10.2.3. <i>Steady State Stability Limit (SSSL)</i> .....	125
<b>BAB XI</b>	<b>INFERENSI .....</b>	<b>134</b>
	DAFTAR PUSTAKA .....	136
	LAMPIRAN .....	141
	DATA RIWAYAT PENULIS .....	186

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1</b>	Peristiwa <i>Voltage Collapse</i> <sup>[2,5]</sup> .....	7
<b>Tabel 2</b>	Informasi Generator dan Beban IEEE 14 Bus.....	36
<b>Tabel 3</b>	Informasi Saluran IEEE 14 Bus.....	36
<b>Tabel 4</b>	Informasi Pembangkitan Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali .....	37
<b>Tabel 5</b>	Informasi Saluran Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa- Bali .....	37
<b>Tabel 6</b>	Informasi Operasi Sistem Sulseltrabar .....	39
<b>Tabel 7</b>	Informasi Transmisi Sistem Sulseltrabar.....	40
<b>Tabel 8</b>	Hubungan Impedansi Generator dan Beban.....	65
<b>Tabel 9</b>	Hubungan Biaya terhadap perubahan Beban.....	66
<b>Tabel 10</b>	Perolehan <i>Load Flow</i> Sistem Sulseltrabar.....	68
<b>Tabel 11</b>	Pengaruh Konstanta $p_1$ dan $p_3$ terhadap Penurunan Batas Kestabilan .....	71
<b>Tabel 12</b>	Perolehan <i>Load Flow</i> Sistem IEEE 14 Bus .....	72
<b>Tabel 13</b>	Perbandingan Hubungan Perubahan <i>Tap Changer</i> dengan Pembebanan Maksimum dan Tegangan Kritis .....	77
<b>Tabel 14</b>	Nilai Admitansi Bus REI-Dimo untuk Sistem Jawa-Bali 500 kV .....	80
<b>Tabel 15</b>	Parameter REI-Dimo .....	81
<b>Tabel 16</b>	Beberapa Informasi yang Diperoleh dari REI-Dimo.....	82
<b>Tabel 17</b>	Perbandingan Hasil dari REI-Dimo dengan ANN.....	85
<b>Tabel 18</b>	Beberapa Informasi Pemeriksaan .....	86
<b>Tabel 19</b>	Perbandingan Informasi Pemeriksaan terhadap Target untuk <i>Index SSSL</i> .....	86
<b>Tabel 20</b>	Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Target untuk <i>Voltage Load Center</i> .....	86
<b>Tabel 21</b>	Perbandingan Hasil REI-Dimo dan Hasil Estimasi ANN .....	87

<b>Tabel 22</b>	Beberapa Representasi Informasi yang Digunakan sebagai Informasi <i>Input</i> ELM.....	89
<b>Tabel 23</b>	Beberapa Informasi Pemeriksaan untuk ELM.....	93
<b>Tabel 24</b>	Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Target untuk Indeks SSSL.....	93
<b>Tabel 25</b>	Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Target untuk Tegangan pada <i>Load Center</i> .....	94
<b>Tabel 26</b>	Matriks Jacobian Reduksi Sistem Jawa-Bali 500kV .....	97
<b>Tabel 27</b>	Nilai <i>Eigen</i> dari Matriks Jacobian Reduksi Sistem Jawa-Bali 500 kV.....	98
<b>Tabel 28</b>	Matriks Jacobian Reduksi Sistem IEEE 14 Bus .....	99
<b>Tabel 29</b>	Nilai <i>Eigen</i> Matriks Jacobian Reduksi Sistem IEEE 14 Bus .....	100
<b>Tabel 30</b>	Beberapa Representasi Informasi <i>Input</i> untuk ELM pada Kasus IEEE 14 Bus .....	101
<b>Tabel 31</b>	Beberapa Informasi <i>Input Extreme Learning Machine</i> untuk Sistem Jawa-Bali 500 kV.....	103
<b>Tabel 32</b>	Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Hasil ELM untuk Sistem IEEE 14 Bus.....	105
<b>Tabel 33</b>	Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Hasil ELM untuk Sistem Jawa-Bali .....	106
<b>Tabel 34</b>	Matriks Thevenin antara Pembangkit dan Beban .....	108
<b>Tabel 35</b>	Hasil Optimasi Pembangkit Menggunakan Strategi GA [45].....	108
<b>Tabel 36</b>	Hasil Optimasi Pembangkit Menggunakan Strategi NN-GA <sup>[45]</sup> .....	109
<b>Tabel 37</b>	Hasil Optimasi Pembangkit Menggunakan Strategi <i>Merit Order</i> .....	109
<b>Tabel 38</b>	Hasil Optimasi Pembangkit Menggunakan Impedansi Thevenin .....	109
<b>Tabel 39</b>	Perbandingan <i>Steady State Stability Limit</i> untuk Strategi Operasi yang Berbeda.....	111
<b>Tabel 40</b>	Perbandingan <i>Power Stability Reserve</i> .....	114
<b>Tabel 41</b>	Perbandingan <i>Voltage Stability Reserve</i> .....	115
<b>Tabel 42</b>	Line Flow dan Losses .....	116

<b>Tabel 43</b>	<i>Power Flow</i> Jaringan 44 Bus.....	120
<b>Tabel 44</b>	Admitansi Konstan dan Arus Beban .....	121
<b>Tabel 45</b>	Matriks Hasil Reduksi .....	123
<b>Tabel 46</b>	<i>Power Flow</i> Jaringan 14 Bus.....	125
<b>Tabel 47</b>	Informasi Pemeriksaan REI-Dimo dengan Bakaru sebagai <i>Slack Bus</i> .....	126
<b>Tabel 48</b>	Informasi Pemeriksaan REI-Dimo dengan PGAYA sebagai <i>Slack Bus</i> .....	128
<b>Tabel 49</b>	Informasi Pemeriksaan REI-Dimo dengan Sengkang sebagai <i>Slack Bus</i> .....	130

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1</b>	Torsi Mekanis dan Elektrik pada <i>Shaft Generator</i> <sup>[2]</sup> .....	9
<b>Gambar 2</b>	Stator, Rotor, Resultan MMF, dan Sudut Torsi <sup>[1,2]</sup> .....	9
<b>Gambar 3</b>	Mesin Sinkron Terhubung ke <i>Infinite Bus</i> <sup>[2]</sup> .....	10
<b>Gambar 4</b>	Diagram <i>Phasor</i> , Generator Terhubung ke <i>Infinite Bus</i> <sup>[5]</sup> .....	11
<b>Gambar 5</b>	Single Machine Terhubung Infinite Bus <sup>[5]</sup> .....	12
<b>Gambar 6</b>	Kurva PV <sup>[5]</sup> .....	17
<b>Gambar 7</b>	Model Representasi <i>Tap-Changing Transformator</i> .....	19
<b>Gambar 8</b>	Ekuivalen $\pi$ untuk Transformator dengan <i>Tap Changer</i> .....	20
<b>Gambar 9</b>	Model Thevenin Equivalent .....	20
<b>Gambar 10</b>	Model Generator Sinkron yang Terhubung ke Sistem Tenaga.....	21
<b>Gambar 11</b>	Model Field Current Limiting .....	22
<b>Gambar 12</b>	Struktur <i>Neural Network</i> <sup>[24]</sup> .....	26
<b>Gambar 13</b>	Proses Arah Maju <sup>[24]</sup> .....	26
<b>Gambar 14</b>	Struktur ELM.....	31
<b>Gambar 15</b>	Tahap Peninjauan.....	34
<b>Gambar 16</b>	Diagram Garis Tunggal Sistem IEEE 14 Bus.....	35
<b>Gambar 17</b>	Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa Bali .....	38
<b>Gambar 18</b>	Diagram Garis Tunggal Sistem Sulseltrabar .....	39
<b>Gambar 19</b>	Tata Pelaksanaan Peninjauan Awal .....	42
<b>Gambar 20</b>	Zero Power Balance Network <sup>[7]</sup> .....	44
<b>Gambar 21</b>	REI untuk Pusat Beban Fiktif (Kiri) dan untuk Bus Beban Aktual (Kanan) <sup>[7]</sup> .....	45
<b>Gambar 22</b>	Blok Diagram dari Strategi yang Akan Digunakan .....	47
<b>Gambar 23</b>	Hubungan Transfer Daya dan Batas Stabilitas <sup>[7]</sup> .....	48

<b>Gambar 24</b>	Tata Pelaksanaan Peninjauan Setelah <i>Load Characteristic</i> , <i>Tap Changer</i> dan <i>Current Limiter</i> Dipertimbangkan.....	49
<b>Gambar 25</b>	Tata Pelaksanaan Peninjauan Pengaruh <i>Load Characteristic</i> terhadap Nilai SSSL Sistem .....	51
<b>Gambar 26</b>	Tata Pelaksanaan Peninjauan Pengaruh <i>Tap Changer</i> , <i>Load Characteristic</i> , dan <i>Current Limiter</i> pada <i>Steady State Stability</i> .....	52
<b>Gambar 27</b>	Arsitektur Jaringan <i>Backpropagation</i> ANN.....	54
<b>Gambar 28</b>	Tata Pelaksanaan Peninjauan <i>Steady State Stability Limit</i> Menggunakan <i>Artificial Neural Network</i> (ANN).....	56
<b>Gambar 29</b>	Tata Pelaksanaan Peninjauan <i>Steady State Stability Limit</i> Menggunakan <i>Extreme Learning Machine</i> (ELM).....	57
<b>Gambar 30</b>	Struktur ELM .....	58
<b>Gambar 31</b>	Tata Pelaksanaan Peninjauan <i>Steady State Stability</i> Menggunakan <i>Extereme Learning Machine</i> Berdasarkan Strategi <i>Modal Analysis</i> .....	60
<b>Gambar 31</b>	Lanjutan: Tata Pelaksanaan Peninjauan <i>Steady State Stability</i> Menggunakan <i>Extereme Learning Machine</i> Berdasarkan Strategi <i>Modal Analysis</i> .....	61
<b>Gambar 32</b>	Sistem dengan Tiga Generator dan Tiga Beban .....	62
<b>Gambar 33</b>	Tata Pelaksanaan Peninjauan <i>Active Power Rescheduling</i> .....	64
<b>Gambar 34</b>	Rangkaian Thevenin.....	65
<b>Gambar 35</b>	Penentuan Impedansi Thevenin.....	66
<b>Gambar 36</b>	Profil Tegangan pada Sistem Sulseltrabar.....	69
<b>Gambar 37</b>	Hubungan antara Daya Aktif dan Tegangan untuk Karakteristik Beban yang Berbeda pada Sistem Sulseltrabar.....	70
<b>Gambar 38</b>	Hubungan antara Daya Aktif dan Tegangan untuk Nilai Konstanta $p_1$ dan $p_3$ yang Berubah.....	71
<b>Gambar 39</b>	Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus .....	73
<b>Gambar 40</b>	<i>Function Block</i> AVR pada <i>Software</i> PSAT.....	73

<b>Gambar 41</b>	<i>Function Block Tap Changer</i> pada <i>Software PSAT</i> .....	74
<b>Gambar 42</b>	Hubungan <i>Loading</i> Parameter terhadap Tegangan Bus .....	75
<b>Gambar 43</b>	Hubungan <i>Loading</i> Parameter vs Tegangan Bus 14 dan Bus 9 .....	76
<b>Gambar 44</b>	Skema Peninjauan SSSL Menggunakan ANN .....	79
<b>Gambar 45</b>	Sistem Jawa-Bali 500 kV Setelah Direduksi .....	80
<b>Gambar 46</b>	<i>Steady State Stability Limit</i> (SSSL) untuk Sistem Jawa-Bali .....	81
<b>Gambar 47</b>	<i>Training Performance</i> .....	83
<b>Gambar 48</b>	<i>Regression Plot</i> .....	83
<b>Gambar 49</b>	Perbandingan Nilai Daya Aktif pada Pusat Beban P (MW) terhadap Indeks SSSL antara REI-Dimo dan ANN.....	84
<b>Gambar 50</b>	Perbandingan Nilai Daya Aktif pada Pusat Beban P (MW) terhadap Tegangan pada Pusat Beban antara REI-Dimo dan ANN .....	85
<b>Gambar 51</b>	Skema Peninjauan SSSL Menggunakan ELM .....	89
<b>Gambar 52</b>	Perbandingan Nilai SSSL Indeks dan Daya pada Pusat Beban untuk REI-Dimo (Aktual) dan Hasil Pelatihan ELM.....	90
<b>Gambar 53</b>	Perbandingan Nilai SSSL Indeks dan Tegangan pada Pusat Beban untuk REI-Dimo (Aktual) dan Hasil Pelatihan ELM.....	91
<b>Gambar 54</b>	Perbandingan Nilai Indeks SSSL antara Informasi Aktual dan Hasil ELM.....	91
<b>Gambar 55</b>	Perbandingan Nilai Tegangan pada Pusat Beban antara Informasi Aktual dan Hasil ELM.....	92
<b>Gambar 56</b>	Algoritma Strategi <i>Modal Analysis</i> .....	95
<b>Gambar 57</b>	Proses Simulasi Strategi ELM dalam Penentuan Bus Terlemah.....	96
<b>Gambar 58</b>	Nilai <i>Bus Participation Factor</i> untuk Sistem Jawa-Bali 500 kV .....	99
<b>Gambar 59</b>	Nilai <i>Bus Participation Factor</i> untuk Sistem IEEE 14 Bus .....	101

<b>Gambar 60</b>	Perbandingan Hasil <i>Modal Analysis</i> dan Hasil ELM untuk Sistem IEEE 14 Bus .....	104
<b>Gambar 61</b>	Perbandingan Hasil <i>Modal Analysis</i> dan Hasil ELM untuk Sistem Jawa-Bali .....	105
<b>Gambar 62</b>	Kurva PV Sistem Interkoneksi Jawa Bali untuk Metode Optimasi yang Berbeda .....	110
<b>Gambar 63</b>	Hubungan P dengan Perubahan Nilai d dan e .....	112
<b>Gambar 64</b>	Hubungan Daya Aktif dan Nilai Indeks Stabilitas .....	112
<b>Gambar 65</b>	Hubungan Tegangan dan Nilai Indeks Stabilitas .....	113
<b>Gambar 66</b>	Tampilan GUI MATLAB dengan Beban Aktual .....	125
<b>Gambar 67</b>	Kurva PV dengan Bakaru sebagai <i>Slack Bus</i> .....	127
<b>Gambar 68</b>	Kurva Sudut Tegangan dengan Bakaru sebagai <i>Slack Bus</i> .....	127
<b>Gambar 69</b>	Kurva Indeks Stabilitas dengan Bakaru sebagai <i>Slack Bus</i> .....	128
<b>Gambar 70</b>	Kurva PV dengan PGAYA sebagai <i>Slack Bus</i> .....	129
<b>Gambar 71</b>	Kurva Sudut Tegangan dengan PGAYA sebagai <i>Slack Bus</i> .....	129
<b>Gambar 72</b>	Kurva Indeks Stabilitas dengan PGAYA sebagai <i>Slack Bus</i> .....	130
<b>Gambar 73</b>	Kurva PV dengan Sengkang sebagai <i>Slack Bus</i> .....	131
<b>Gambar 74</b>	Kurva Sudut Tegangan dengan Sengkang sebagai <i>Slack Bus</i> .....	132
<b>Gambar 75</b>	Kurva Indeks Stabilitas dengan Sengkang sebagai <i>Slack Bus</i> .....	132



# BAB I

## APA DAN MENGAPA STABILITAS DALAM SISTEM TENAGA LISTRIK PENTING?

### 1.1. Memahami Pentingnya Stabilitas dalam Sistem Tenaga Listrik

Masalah stabilitas dalam sistem tenaga listrik berkaitan dengan perilaku mesin sinkron setelah mengalami gangguan. Stabilitas sistem tenaga listrik akan menyebabkan guncangan pada poros rotor generator akibat generator itu sendiri<sup>[1,2,3,4,5]</sup>. Sistem tenaga listrik modern berisi banyak perangkat dinamis yang berbeda, yaitu terdiri dari mesin sinkron dan beban yang selalu rentan terhadap gangguan internal dan eksternal. Pada keadaan tersebut sering terjadi osilasi setiap bagian dan antarbagian sistem tenaga listrik yang saling berhubungan.

Dalam sistem tenaga listrik yang beroperasi dengan kondisi stabil, terdapat keseimbangan antara daya *input* mekanis penggerak utama (*prime mover*) dan daya *output* listrik. Pada kondisi tersebut, semua generator berputar dengan kecepatan sinkron. Setiap kenaikan atau penurunan beban harus disertai dengan perubahan daya mekanis penggerak utama generator. Jika daya mekanis tidak sesuai dengan daya beban dan rugi-rugi sistem, kecepatan rotor generator (frekuensi sistem) dan tegangan akan menyimpang dari kondisi normal. Khususnya jika ada gangguan, dapat terjadi redaman sementara yang besar antara daya *input* mekanis penggerak utama dan daya *output* listrik generator. Daya mekanis yang melebihi daya listrik menyebabkan generator berputar lebih cepat, begitu pula sebaliknya. Percepatan atau perlambatan putaran rotor generator akan menyebabkan sistem kehilangan sinkronisasi jika gangguan tidak segera dihilangkan<sup>[2,4,7]</sup>.

Selama beberapa dekade terakhir, fenomena *voltage collapse* telah meningkat di seluruh dunia. Hal ini terjadi karena peningkatan konsumen

listrik tidak dapat diimbangi dengan peningkatan generator dan pembangunan jaringan transmisi. Adapun faktor-faktor yang dapat menyebabkan *voltage collapse*, yaitu tegangan pada sistem akibat tingginya daya aktif yang dibebankan pada sistem, ketidakseimbangan sumber daya reaktif, dan kegagalan relai proteksi untuk berfungsi dengan baik<sup>[5,23]</sup>.

Dalam beberapa tahun terakhir, ketidakstabilan tegangan yang disebabkan oleh terlampauinya batas beban maksimum adalah penyebab utama dari beberapa kasus *voltage collapse* pada sistem tenaga listrik, seperti yang terjadi di Prancis pada 12 Januari 1987 selama beberapa menit, dan banyak kasus *blackout* lainnya<sup>[2]</sup>.

Strategi *Load Flow* telah digunakan untuk menghitung total beban dengan menambahkan beban hingga proses aliran daya menjadi tidak konvergen. Strategi *Continuation Power Flow* (CPF) juga sering digunakan untuk mengetahui hubungan *loading* parameter dengan tegangan setiap bus. Kedua strategi konvensional ini memiliki kelemahan karena tidak mencantumkan nilai internal reaktansi generator ( $X_d'$ ,  $X_d''$ ,  $X_d$ ) dalam pemodelan dan penelaahan. Kelemahan lainnya adalah pada masalah komputasi, karena dalam strategi *Load Flow* dan CPF dilakukan proses siklus berulang dan memerlukan waktu komputasi yang lama sehingga strategi ini tidak cocok untuk diterapkan pada *monitoring* sistem secara *real time*<sup>[7]</sup>.

Tinjauan praktis penentuan *steady state limit* telah dilakukan di Rusia<sup>[7]</sup> dengan menurunkan persamaan matematis untuk *Dinamyc Jacobian*. Namun, strategi ini juga membutuhkan waktu komputasi yang jauh lebih lama daripada strategi yang dikembangkan oleh Paul Dimo<sup>[7,13,15]</sup>. Strategi Dimo telah berhasil diterapkan untuk menghitung batas beban secara *real time*<sup>[7,35]</sup>.

Dalam penerapan penentuan *steady state stability*, strategi REI-Dimo yang ada belum memperhitungkan pengaruh *load characteristic*, *tap changer*, dan *current limiter*. Oleh karena itu, dalam tinjauan ini pengaruh dari ketiga parameter tersebut dimasukkan dalam pemodelan. Selain itu, strategi kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) diterapkan untuk lebih mempersingkat waktu komputasi sehingga pemodelan ini dapat diterapkan pada keadaan *real time monitoring*, yang dalam tinjauan ini menggunakan

*Neural Network* (NN) dan *Extereme Learning Machine* (ELM). Nilai indeks *steady state stability* dari strategi REI-Dimo untuk pola operasi beban yang berubah-ubah akan diajarkan ke NN dan ELM. Dengan demikian, perhitungan *steady state stability* yang lebih cepat akan diperoleh dengan strategi ini.

## **1.2. Esensi Mendalami Stabilitas dalam Sistem Tenaga Listrik**

Esensi tinjauan ini adalah cara menentukan batas stabilitas *steady state* lebih cepat dengan memperhatikan pengaruh *load characteristic*, *load tap changer*, dan *current limiter*, yang terbagi menjadi empat bagian, yaitu (1) penerapan model *Dimo* untuk menentukan batas stabilitas *steady state* dengan mempertimbangkan pengaruh *load characteristic*, *load tap changer*, dan *current limite*; (2) pengubahan model *Dimo* ke dalam bentuk kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) untuk menghasilkan model yang lebih cepat dan akurat untuk diterapkan dalam *steady state stability monitoring* secara *real time*; (3) pemberian batas indeks stabilitas *steady state* untuk setiap pola operasi, terutama pada kondisi beban puncak, sehingga peristiwa pemadaman listrik dapat diprediksi lebih dini; dan (4) hubungan antara batas stabilitas *steady state* dengan pola operasi ekonomis dari pembangkit yang ada, sehingga diperoleh nilai optimal dari aspek stabilitas dan ekonomi.

## **1.3. Arah Haluan Mendalami Stabilitas dalam Sistem Tenaga Listrik**

Tujuan dilaksanakannya tinjauan ini adalah untuk menambahkan parameter *load characteristic*, *tap changer*, dan *current limiter* pada model *Dimo* untuk mendapatkan model yang lebih baik dalam menjelaskan batas *steady state stability*. Di samping itu, tinjauan ini bertujuan untuk menerapkan *Neural Network* dan *Extreme Learning Machine* untuk menentukan batas indeks *steady state stability* pada kondisi pembebanan yang beragam. Kemudian untuk memberikan indeks *steady state stability*, yaitu nilai sistem mendekati keadaan tidak stabil. Indeks ini sangat berguna bagi operator pengiriman beban di perusahaan pengatur beban

listrik, seperti PLN serta untuk memberikan nilai indeks *steady state stability* untuk penjadwalan ekonomis pembangkit.

#### **1.4. Takrif Persoalan**

Penulis menerapkan sejumlah takrif persoalan dalam tinjauan ini, yaitu (1) tinjauan ini mengulas sistem IEEE 14 bus dan sistem interkoneksi Sulseltrabar; (2) model *load characterisric*, *tap changer*, dan *current limiter* merujuk kepada model IEEE; dan (3) stabilitas yang ditelaah hanya batas stabilitas *steady state*.

#### **1.5. Daya Guna Mendalami Stabilitas dalam Sistem Tenaga Listrik**

Tinjauan ini diharapkan dapat berkontribusi dengan lebih baik dalam pemodelan *steady state stability* daripada strategi Dimo yang sudah ada. Pemodelan dalam tinjauan ini mempertimbangkan pengaruh *load characteristic*, *tap changer*, dan *current limiter*. Memasukkan ketiga parameter ini untuk menentukan indeks *steady state* sistem membuat nilai indeks yang diperoleh lebih akurat dan dapat mewakili keadaan sebenarnya di sistem tenaga listrik. Nilai indeks ini juga berguna bagi operator pengatur beban (*dispatcher*) saat mengoperasikan dan mengatur sistem tenaga listrik agar kelangsungan pelayanan dapat terjaga dengan baik.

Tinjauan ini juga berkontribusi dalam penerapan kecerdasan buatan, dalam hal ini *neural network* dan *Extereme Learning Machine*, untuk menentukan indeks batas stabilitas *steady state*. Penerapan strategi ini diharapkan dapat mempercepat waktu komputasi untuk mempermudah penerapan penentuan indeks stabilitas *steady state* pada kondisi *real time monitoring*.

#### **1.6. Sistematika Buku**

Buku ini terdiri atas 11 bab, yang dirangkum sebagai berikut. Bab 1 berisi uraian mengenai pentingnya memahami stabilitas dalam tenaga listrik, yang disertai dengan esensi, arah haluan, takrif persoalan, dan daya guna mendalami stabilitas dalam tenaga listrik serta sistematika buku. Bab

2 menguraikan tentang sejumlah tinjauan yang telah dilakukan sebelumnya, juga menguraikan secara rinci mengenai stabilitas dalam sistem tenaga listrik. Bab 3 menguraikan tata proses mendalami stabilitas dalam tenaga listrik. Bab 4 membahas tentang pengaruh karakteristik beban terhadap batas stabilitas *steady state*. Bab 5 menguraikan pengaruh *tap changer*, *load characteristic*, dan *current limiter* terhadap stabilitas *steady state*. Bab 6 membahas tentang batas stabilitas *steady state* menggunakan *Artificial Neural Network* (ANN) untuk Sistem Jawa-Bali. Bab 7 memaparkan penentuan batas stabilitas *steady state* menggunakan kombinasi REI-Dimo dan *Extreme Learning Machine* (ELM). Bab 8 membahas tentang stabilitas *steady state* menggunakan *Extereme Learning Machine* berdasarkan strategi *Modal Analysis*. Bab 9 menguraikan *active power rescheduling* untuk meningkatkan indeks stabilitas *steady state*. Bab 10 membahas tentang stabilitas *steady state* pada sistem Sulselbar. Dan bab 11 berisi inferensi dari tinjauan yang telah dilaksanakan.

# BAB II

## DISKUSI WACANA DAN KONTEMPLASI PENELAAHAN

### 2.1. Penelaahan *Steady State Stability*

Batas *steady state stability* sistem tenaga mengacu pada keadaan operasi *steady state* di mana sistem tenaga listrik masih dalam keadaan stabil, namun perubahan kecil pada parameter operasi akan menyebabkan sistem kehilangan stabilitas<sup>[1]</sup>. Definisi awal mengacu pada konsep bahwa stabilitas sistem secara bertahap dan perlahan berubah di bawah kondisi perubahan beban<sup>[2]</sup>. *Voltage collapse* menyebabkan sistem kehilangan sinkronisasi dan menjadi tidak stabil karena penguatan osilasi kecil dari semua bentuk ketidakstabilan *steady state*.

Dari keadaan sebenarnya di lapangan, *steady state stability* berkaitan erat dengan rendahnya ketersediaan daya aktif dan daya reaktif, level tegangan rendah, dan besarnya perubahan tegangan ketika beban atau daya pembangkit berubah<sup>[3,4,6,7]</sup>.

Strategi konvensional berdasarkan perhitungan konvergensi dari aliran daya Newton-Raphson diusulkan oleh Venikov<sup>[2,5,8]</sup>. Strategi ini memerlukan waktu komputasi yang lama. Kemudian, beberapa penelaah memperbaiki strategi ini dengan menambahkan algoritma baru untuk melakukan beberapa solusi aliran daya<sup>[7,8,22]</sup>. Chebbo<sup>[8]</sup> menggunakan konsep teori dua bus untuk memperkirakan batas beban maksimum sistem tenaga listrik. Dalam strategi ini, sistem tenaga diubah menjadi dua bus yang dihubungkan oleh impedansi thevenin. Penentuan impedansi thevenin sistem memerlukan perhitungan aliran daya sehingga menentukan batas pembebanan suatu bus pada strategi ini membutuhkan perhitungan *load flow* yang berulang sehingga strategi ini sulit diterapkan secara praktis<sup>[8,22,27,31,32,33,34]</sup>.

## 2.2. Pentingnya Penentuan *Steady State Stability Limit*

Dengan peningkatan konsumsi daya, tetapi tidak ada peningkatan yang signifikan pada pasokan daya dari sisi pembangkit listrik dan tidak ada transmisi baru, maka fenomena *steady state stability* akan sering terjadi<sup>[2,3,5,7,11,12,14,19,20]</sup>.

Dalam beberapa tahun terakhir, ketidakstabilan tegangan karena melebihi batas beban maksimum telah memainkan peran utama dalam beberapa peristiwa *voltage collapse* pada sistem tenaga listrik, seperti yang ditunjukkan pada tabel di bawah ini<sup>[2]</sup>.

**Tabel 1** Peristiwa *Voltage Collapse*<sup>[2,5]</sup>

Tanggal	Lokasi	Durasi
13 April 1986	Winnipeg, Canada Nelson River HVDC link	1 detik
30 November 1986	SE Brazil, Paraguay	2 detik
17 Mei 1985	South Florida	4 detik
22 Agustus 1987	Western Tennessee	10 detik
27 Desember 1983	Swedia	55 detik
21 Mei 1983	Northern California	2 menit
2 September 1982	Florida	1-3 menit
26 November 1982	Florida	1-3 menit
28 Desember 1982	Florida	1-3 menit
30 Desember 1982	Florida	1-3 menit
22 September 1977	Jacksonville, Florida	Beberapa menit
4 Agustus 1982	Belgia	4,5 menit
20 Mei 1986	Inggris	5 menit
12 Januari 1987	Perancis	6-7 menit
9 Desember 1965	Perancis	Tidak diketahui
10 November 1976	Perancis	Tidak diketahui
23 Juli 1987	Tokyo	20 menit
19 Desember 1978	Perancis	26 menit
22 Agustus 1970	Jepang	30 menit
22 September 1970	New York State	Beberapa Jam
20 Juli 1987	Illinois dan Indiana	Beberapa Jam
11 Juni 1984	Amerika Serikat	Beberapa Jam

Dalam menyalurkan daya dari pembangkit ke beban, transmisi memiliki keterbatasan. Keterbatasan transfer daya ini dipengaruhi oleh nilai parameter tegangan, sudut bus dan nilai reaktansi transmisi. Pada sub

bab berikutnya, akan diuraikan persamaan matematis yang menunjukkan besarnya transfer daya maksimum antar bus.

### 2.3. Jarak ke Kondisi Tidak Stabil-Batas Aman

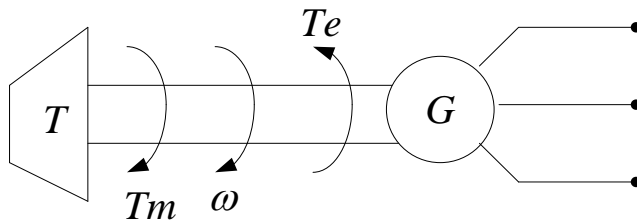
Batas *steady state stability* dapat diartikan sebagai beban total maksimum pada sistem sebelum sistem memasuki keadaan tidak stabil.

Strategi *load flow* sudah digunakan untuk menghitung beban total dengan menambahkan beban hingga proses *load flow* menjadi tidak konvergen. Strategi *Continuation Power Flow* (CPF) juga sering digunakan dengan mengetahui hubungan *loading* parameter dengan tegangan setiap bus. Kedua strategi konvensional ini memiliki kelemahan karena tidak mencantumkan nilai internal reaktansi generator ( $X_d'$ ,  $X_d''$ ,  $X_d$ ) dalam pemodelan dan penelaahan. Kelemahan lainnya adalah masalah komputasi, karena *strategi Load Flow* dan CPF memerlukan waktu komputasi yang lebih lama dalam melakukan proses looping iterasi sehingga strategi ini tidak cocok untuk diterapkan pada pemantauan sistem secara *real time*.

Tinjauan praktis penentuan batas *steady state* telah dilakukan di Rusia<sup>[7]</sup> dengan menurunkan persamaan matematis dari Dinamyc Jacobian. Namun, strategi ini juga memerlukan waktu komputasi yang lebih lama daripada strategi yang dikembangkan oleh Paul Dimo<sup>[6,7,8]</sup>. Strategi *Dimo* telah berhasil diterapkan pada perhitungan batas beban secara *real time*<sup>[12,22,23,27,28]</sup>.

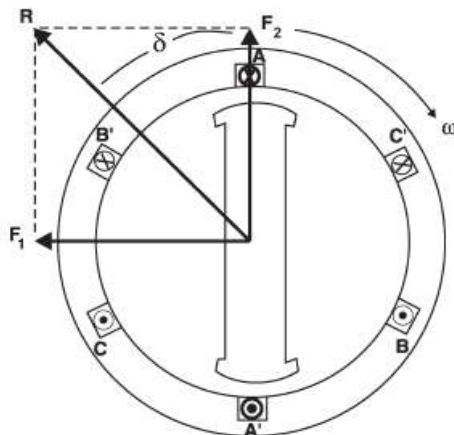
### 2.4. Konsep Dasar Stabilitas *Steady State*

Dalam sistem yang terhubung ke sistem tenaga listrik, rotor setiap mesin sinkron pada sistem berputar pada kecepatan listrik yang sama. Daya listrik yang disalurkan dari generator ke beban sama dengan daya mekanis yang dihasilkan oleh penggerak utama. Selama keadaan operasi *steady state*, *output* daya listrik seimbang dengan *input* daya mekanis. *Input* daya mekanis dari penggerak utama ke poros rotor adalah hasil kali torsi dan kecepatan,  $P_M = T_M \omega$ . Torsi mekanis searah putaran. Sedangkan arah torsi listrik yang dihasilkan generator berlawanan dengan arah putaran rotor, seperti yang tampak pada gambar berikut.



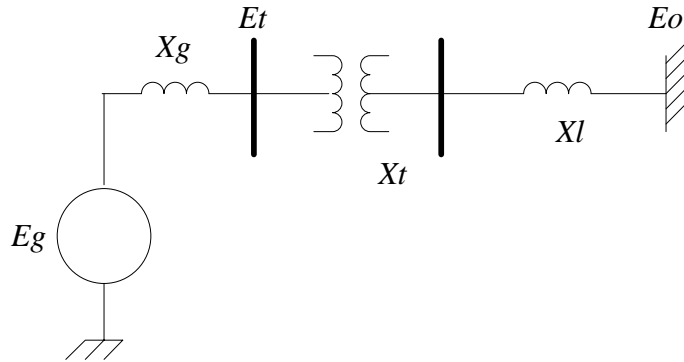
**Gambar 1** Torsi Mekanis dan Elektrik pada *Shaft Generator*<sup>[2]</sup>

Ketika sistem terganggu atau daya berubah dengan cepat, *output* daya listrik dari generator juga akan berubah. *Output* daya listrik dari generator berubah dengan cepat, namun daya mekanis yang masuk ke generator berubah relatif lambat. Ada perbedaan sesaat dalam keseimbangan daya karena perbedaan kecepatan respons. Ketidakseimbangan daya ini menyebabkan perbedaan torsi pada poros sehingga akselerasi atau deselerasi bergantung pada arah ketidakseimbangan. Perubahan kecepatan rotor juga menyebabkan perubahan sudut rotor. Gambar berikut menunjukkan hubungan antara sudut rotor  $\delta$ , stator *magneto motive force* (MMF)  $F_1$ , dan rotor MMF  $F_2$ . Sudut torsi  $\delta$  adalah sudut antara  $F_2$  dan resultan vektor dari rotor dan stator R.



**Gambar 2** Stator, Rotor, Resultan MMF, dan Sudut Torsi<sup>[1,2]</sup>

Gambar berikut adalah rangkaian yang mewakili generator yang terhubung ke *infinite bus* melalui transmisi. Generator sinkron dimodelkan sebagai sumber tegangan  $E_g$ , yang terhubung secara seri dengan impedansi  $X_g$ .



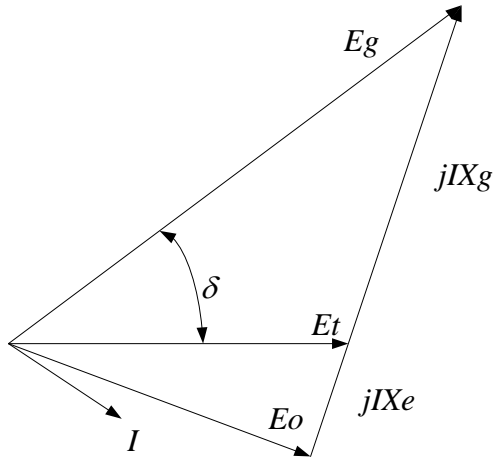
**Gambar 3** Mesin Sinkron Terhubung ke *Infinite Bus*<sup>[2]</sup>

Tegangan terminal generator  $E_T$  dinaikkan ke level tegangan transmisi melalui trafo *step-up*, yang dinyatakan sebagai impedansi  $X_T$ . Tegangan tinggi pada sisi trafo *step-up* dihubungkan ke *infinite bus* melalui saluran transmisi yang dinyatakan sebagai reaktansi  $X_L$ .

Daya *output* generator dalam kondisi *steady state* dijelaskan dengan rumus (1)

$$P_e = \frac{E_g E_T}{X_g} \sin \delta \quad (1)$$

Nilai  $\delta$  adalah sudut antara tegangan terminal generator dengan tegangan internal generator. Ketika daya ditransmisikan meningkat, sudut  $\delta$  juga akan meningkat. Ketika terjadi gangguan pada sistem, hal itu menyebabkan perubahan aliran daya, yang selanjutnya menyebabkan perubahan sudut daya  $\delta$ , seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



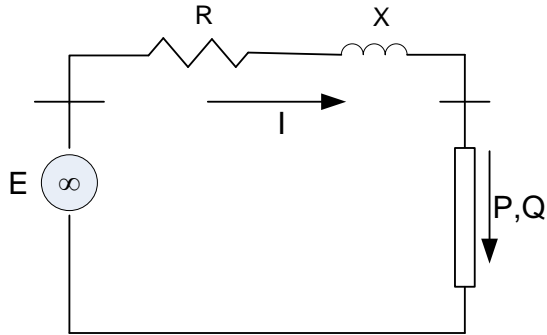
**Gambar 4** Diagram *Phasor*, Generator Terhubung ke *Infinite Bus*<sup>[5]</sup>

Jika terjadi gangguan yang menyebabkan arus  $I$  meningkat dan menyebabkan penurunan tegangan terminal, keluaran generator akan berkurang. Gangguan ini menyebabkan sudut rotor bertambah dan dapat melebihi batas operasi sinkron generator. Perubahan aliran daya akan menyebabkan perubahan percepatan rotor, yang akan menyebabkan relai proteksi beroperasi untuk melepaskan generator dari sistem. Gangguan pada sistem lainnya karena hilangnya generator dapat menyebabkan generator lain terputus dari sistem dan mungkin mengalami *cascade outage*.

## 2.5. Sistem Transmisi

### 2.5.1. Sistem *Single Load Infinite Bus*

Gambar berikut menunjukkan sistem sederhana yang terdiri dari beban yang terhubung ke *infinite bus* melalui saluran transmisi. Asumsikan bahwa nilai tegangan dan frekuensi konstan pada *infinite bus*. Setiap *phase* kemudian dijelaskan dengan asumsi sistem dalam operasi tiga *phase* seimbang. Kondisi *steady state* sinusoidal dijelaskan dalam bentuk *phasor* dan bilangan kompleks.



**Gambar 5** Single Machine Terhubung Infinite Bus <sup>[5]</sup>

Pada Gambar 2, *infinite bus* direpresentasikan sebagai sumber tegangan ideal  $E$ . Saluran transmisi direpresentasikan sebagai resistansi  $R$  dan reaktansi  $X$  secara seri. Untuk menyederhanakan, kapasitor *shunt* diabaikan. Impedansi transmisi yaitu sebagai berikut.

$$Z = R + jX \quad (2)$$

Dengan faktor daya pada beban yaitu sebagai berikut.

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} = \cos \phi \quad (3)$$

$P$ ,  $Q$ , dan  $S$  adalah daya aktif, reaktif, dan daya total.  $\phi$  adalah sudut yang digambarkan pada Gambar 4.

## 2.6. Daya Maksimum yang Disalurkan

### 2.6.1. Daya Maksimum yang Tidak Dibatasi

Untuk menyederhanakan, asumsikan beban sebagai impedansi. Impedansi beban ditulis sebagai berikut.

$$Z_l = R_l + jX_l \quad (4)$$

Dengan,  $R_l$  dan  $X_l$  adalah resistansi dan reaktansi beban.

Asumsikan  $R_l$  dan  $X_l$  nilainya bebas, kemudian akan dicari nilai maksimum daya aktif yang dikonsumsi beban.

Arus  $I$  pada Gambar 2 diberikan sebagai berikut.

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}}{(R+R_l)+j(X+X_l)} \quad (5)$$

Dan daya aktif yang dikonsumsi beban yaitu sebagai berikut.

$$P = R_l I^2 = \frac{R_l \bar{E}^2}{(R+R_l)^2 + (X+X_l)^2} \quad (6)$$

P dimaksimalkan melalui  $R_l$  dan  $X_l$ , dengan keadaan maksimum terjadi ketika:

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial X_l} = 0$$

Dengan menurunkan persamaan (5), maka diperoleh persamaan berikut.

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = \frac{E^2\{(R + R_l)^2 + (X + X_l)^2\} - 2(R + R_l) \cdot R_l E^2}{((R + R_l)^2 + (X + X_l)^2)^2} = 0$$

$$E^2\{(R + R_l)^2 + (X + X_l)^2\} - 2(R + R_l) \cdot R_l E^2 = 0$$

Diperoleh persamaan berikut.

$$(R + R_l)^2 + (X + X_l)^2 - 2R_l (R + R_l) = 0$$

Kemudian persamaan berikut.

$$\frac{\partial P}{\partial X_l} = \frac{0 - 2(X + X_l)R_l E^2}{((R + R_l)^2 + (X + X_l)^2)^2} = 0$$

$$-2(X + X_l)R_l E^2 = 0$$

$$-R_l(X + X_l) = 0$$

Setelah dilakukan perhitungan, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$(R + R_l)^2 + (X + X_l)^2 - 2R_l (R + R_l) = 0 \quad (7)$$

$$-R_l (R + R_l) = 0 \quad (8)$$

Solusi dari persamaan ini, dengan batas  $R_l > 0$ , yaitu sebagai berikut.

$$R_l = R$$

$$X_l = -X$$

Atau dalam bentuk kompleks adalah sebagai berikut.

$$Z_l = Z^*$$

Dengan demikian, daya beban maksimum pada saat impedansi beban sama dengan impedansi transmisi.

### 2.6.2. Daya Maksimum untuk Kondisi Faktor Daya Diperhitungkan

Ketika faktor daya dipertimbangkan dalam menentukan daya maksimum yang dapat ditransfer, bentuk impedansi beban menjadi:

$$Z_l = R_l + X_l = R_l + jR_l \tan \phi \quad (9)$$

Arus I pada sistem menjadi:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}}{(R + R_l) + j(X + R_l \tan \phi)}$$

Dan daya aktif beban adalah:

$$P = R_l I^2 = \frac{R_l \bar{E}^2}{(R + R_l)^2 + (X + R_l \tan \phi)^2} \quad (10)$$

Kondisi maksimum terjadi apabila:

$$\frac{\partial P}{\partial R_l} = 0$$

Dan diperoleh persamaan berikut.

$$(R^2 + X^2) - R_l^2(1 + \tan^2 \phi) = 0$$

Yang ekuivalen dengan:

$$|Z_l| = |Z|$$

Dari turunan kedua, diperoleh persamaan berikut.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial R_l^2} = -2R_l(1 + \tan^2 \phi)$$

Nilai turunan kedua ini negatif, yang menunjukkan bahwa penyelesaian persamaan tersebut maksimum. Dengan kata lain, pada faktor

daya konstan, daya pada beban dimaksimalkan ketika impedansi beban sama dengan impedansi transmisi.

Nilai optimal untuk resistor dan reaktansi beban adalah sebagai berikut.

$$R_{lmaxP} = |Z| \cos \phi$$

$$X_{lmaxP} = |Z| \sin \phi = R_{lmaxP} \tan \phi$$

### 2.6.3. Rugi Transmisi yang Diabaikan

Untuk kasus  $R = 0$ , nilai resistor daya optimal pada kondisi faktor daya konstan adalah sebagai berikut.

$$R_{lmaxP} = X \cos \phi \quad (11)$$

Dengan menyubstitusikan ke persamaan (9), diperoleh maksimum daya aktif sebagai berikut.

$$P_{max} = \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} \frac{E^2}{2X} \quad (12)$$

Sedangkan daya reaktif adalah sebagai berikut.

$$Q_{maxP} = \frac{\sin \phi}{1 + \sin \phi} \frac{E^2}{2X} \quad (13)$$

Dan tegangan pada sisi penerima sebagai berikut.

$$V_{maxP} = \frac{E}{\sqrt{2} \sqrt{1 + \sin \phi}} \quad (14)$$

### 2.6.4. Rugi Transmisi yang Diabaikan dan Faktor Daya Satu

Jika diasumsikan beban telah dikompensasi sehingga  $\cos \phi = 1$ , resistansi optimal, daya maksimum, dan tegangan pada penerima menjadi:

$$R_{lmaxP} = X$$

$$P_{max} = \frac{E^2}{2X}$$

$$V_{maxP} = \frac{E}{\sqrt{2}} \cong 0.707 E \quad (15)$$

### 2.6.5. Daya Maksimum yang Disalurkan dari Persamaan Aliran Daya

Berdasarkan Gambar 2, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\bar{V} = \bar{E} - jX\bar{I}$$

Daya kompleks yang diserap oleh beban yaitu sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S &= P + jQ = \bar{V} \bar{I}^* = \bar{V} \frac{\bar{E}^* - \bar{V}^*}{-jX} \\ &= \frac{j}{X} (EV \cos \theta + jEV \sin \theta - V^2) \end{aligned} \quad (16)$$

Dengan komposisi sebagai berikut.

$$P = -\frac{EV}{X} \sin \theta \quad (17)$$

$$Q = -\frac{V^2}{X} + \frac{EV}{X} \cos \theta \quad (18)$$

Persamaan aliran daya dari sistem dengan rugi-rugi diabaikan. Untuk nilai beban P dan Q yang diketahui, nilai V dan  $\theta$  dapat ditentukan. Dengan menghapus  $\theta$  dari persamaan (17) dan (18), maka diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$(V^2)^2 + (2QX - E^2)V^2 + X^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (19)$$

Persamaan ini merupakan persamaan orde kedua dari  $V^2$ . Solusi untuk persamaan ini yaitu sebagai berikut.

$$(2QX - E^2)^2 - 4X^2(P^2 + Q^2) \geq 0 \quad (20)$$

Yang dapat disederhanakan menjadi persamaan berikut.

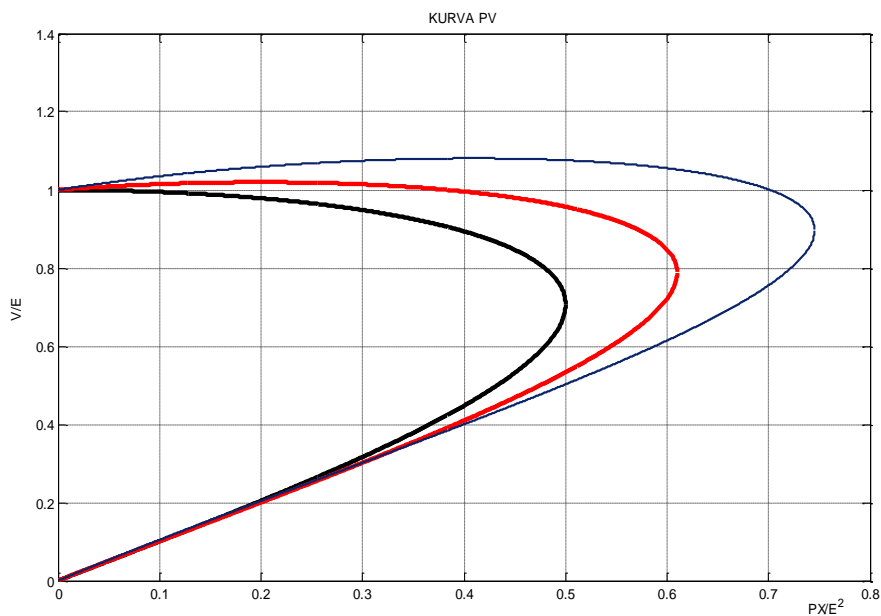
$$-P^2 - \frac{E^2}{X}Q + \left(\frac{E^2}{2X}\right)^2 \geq 0 \quad (21)$$

Solusi untuk persamaan (21) yaitu sebagai berikut.

$$V = \sqrt{\frac{E^2}{2} - QX \pm \sqrt{\frac{E^4}{4} - X^2P^2 - XE^2Q}} \quad (22)$$

Hubungan antara perubahan P dan V lebih dikenal dengan kurva PV. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, ketika daya aktif pada beban

meningkat, tegangan akan berkurang. Ada batas maksimum untuk peningkatan daya aktif ini. Jika batas maksimum ini terlampaui, tegangan akan menjadi tidak stabil (*voltage collapse*). Terlihat juga dari kurva bahwa untuk faktor daya yang berbeda akan diperoleh batas beban yang berbeda pula. Jika faktor daya beban dalam keadaan *leading*, transmisi daya akan bertambah. Sebaliknya, jika faktor daya beban *lagging*, daya maksimum beban akan berkurang<sup>[5]</sup>.



**Gambar 6** Kurva PV<sup>[5]</sup>

Ini berarti bahwa jika profil tegangan baik dalam sistem, daya maksimum yang dialirkan ke beban akan meningkat dan karenanya lebih baik dalam hal stabilitas.

## 2.7. Beban Sistem Tenaga

### 2.7.1. Model Beban Statis

Model beban statis mengungkapkan karakteristik beban ketika waktu instan sesuai dengan fungsi aljabar bus tegangan magnitudo dan

frekuensi ketika keadaan instan. Komponen daya aktif  $P$  dan komponen daya reaktif  $Q$  dianggap terpisah. Secara umum, tegangan ditentukan sesuai dengan karakteristik beban, yang dapat diwakili oleh model eksponensial berikut.

$$P = P_0 (V)^a \quad (23)$$

$$Q = Q_0 (V)^b \quad (24)$$

Dalam hal ini dan model beban lain dideskripsikan sebagai berikut.

$$V = \frac{v}{v_0} \quad (25)$$

Nilai  $P$  dan  $Q$  adalah komponen aktif dan reaktif beban ketika tegangan *magnitude bus* adalah  $V$ . Tanda 0 mengidentifikasi masing-masing nilai unsur pemengaruh (variabel) pada kondisi operasi awal.

Parameter model ini yaitu eksponen  $a$  atau  $b$ . eksponen ini sama dengan 0, 1, atau 2, dan model ini mewakili karakteristik setiap *constant power*, *constant current* atau *constant impedance*. Untuk beban campuran, nilai ini bergantung pada penjumlahan dari karakteristik komponen beban<sup>[33]</sup>.

Eksponen  $a$  (atau  $b$ ) hampir sama dengan pengurangan  $dP/dV$  (atau  $dQ/dV$ ) pada  $V = V_0$ . Untuk sistem beban campuran, eksponen  $a$  biasanya antara 0,5 dan 1,8; eksponen  $b$  biasanya antara 1,5 dan 6. Karakteristik utama dari komponen  $b$  adalah bervariasi sebagai fungsi linear dari tegangan. Hal ini dapat menyebabkan *magnetic saturation* transformator dan motor. Pada tegangan tinggi,  $Q$  cenderung lebih tinggi.

Model alternatif yang sering digunakan untuk merepresentasikan tegangan yang bergantung pada beban adalah model polinomial, yaitu sebagai berikut.

$$P = P_0 [p_1 V^2 + p_2 V + p_3] \quad (26)$$

$$Q = Q_0 [q_1 V^2 + q_2 V + q_3]$$

Pemodelan ini untuk model *ZIP*, yakni komponen *constant impedance (Z)*, *constant current (I)*, dan *constant power (P)*. Parameter dalam model adalah koefisien  $p_1$ ,  $p_2$ , dan  $p_3$  serta  $q_1$ ,  $q_2$ , dan  $q_3$  yang mendefinisikan proporsi masing-masing komponen.

Ketergantungan frekuensi pada karakteristik beban biasanya diwakili oleh model eksponensial atau model polinomial dikalikan dengan faktor-faktor berikut.

$$P = P_0(V)^a(1+K_{pf}\Delta f) \quad (27)$$

$$Q = Q_0(V)^b(1+K_{qf}\Delta f)$$

Atau

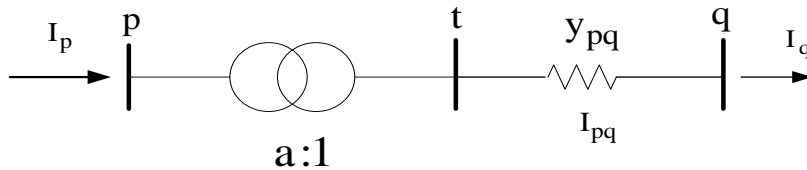
$$P = P_0[p_1V^2+p_2V+p_3] (1+K_{pf}\Delta f) \quad (28)$$

$$Q = Q_0 [q_1V^2+q_2V+q_3] (1+K_{qf}\Delta f)$$

Dengan  $\Delta f$  adalah selisih frekuensi ( $f-f_0$ ). Biasanya,  $K_{pf}$  berkisar dari 0 hingga 3.0, dan  $K_{qf}$  berkisar dari -2.0 hingga 0. Frekuensi bus  $f$  biasanya tidak berubah dalam model sistem yang digunakan untuk menelaah stabilitas. Namun, ini merupakan evaluasi dengan menghitung turunan waktu dari sudut tegangan bus.

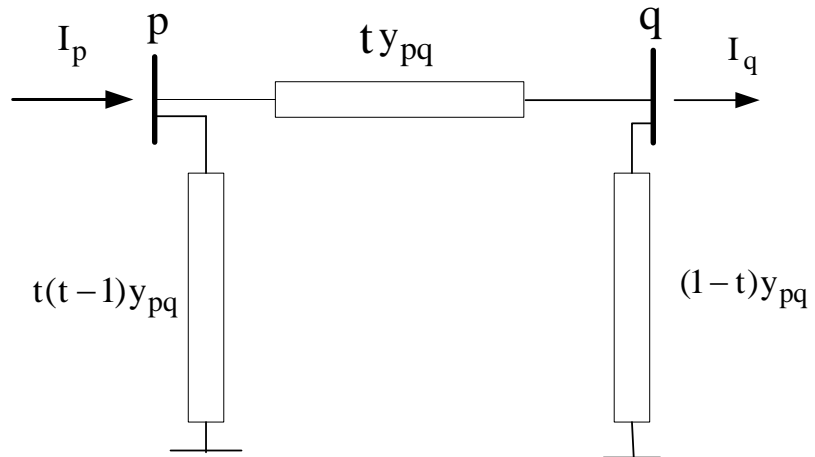
## 2.8. Model Transformator

Transformator dengan rasio belitan dapat dinyatakan sebagai impedansi atau admitansi yang terhubung secara seri dengan autotransformator ideal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.



**Gambar 7** Model Representasi *Tap-Changing Transformer*

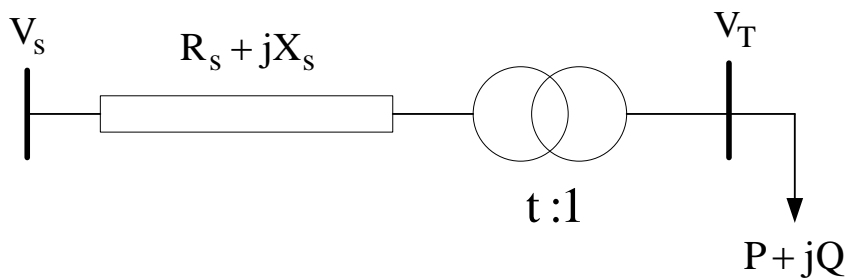
Rasio tap ( $t' = 1/a$ ) adalah deviasi di atas atau di bawah nominal. Nilai rentang ini biasanya antara 0,8 dan 1,2. Terdapat tiga komponen dalam model ekuivalen  $\pi$ , yaitu:  $y_{pq}$ ,  $[(1 - a)/a]$ ,  $y_{pq}$ ,  $[(a - 1)/a^2]$   $y_{pq}$ , atau  $ty_{pq}$ ,  $t[(t - 1)] y_{pq}$  dan  $(1 - t) y_{pq}$  [36].



**Gambar 8** Ekuivalen  $\pi$  untuk Transformator dengan *Tap Changer*

Pada kondisi *tap changing* normal, “a” memiliki nilai rasio 1 sehingga model transformator berubah menjadi seri dengan nilai  $y_{pq}$  sedangkan nilai kedua elemen *shunt* adalah nol.

Gambar 9 menjelaskan hubungan antara daya beban dan rasio *tap changing* untuk tegangan beban yang berbeda.



**Gambar 9** Model Thevenin Equivalent

Dengan menggunakan hubungan penurunan tegangan sederhana, persamaan sistem adalah sebagai berikut.

$$\Delta V = \left| \frac{V_s}{t} \right| - |V_T| = \frac{((X_s + X_t)/t^2)Q + (R_s/t^2)P}{V_T} \quad (29)$$

$$V_T^2 t^2 - V_T V_S t + R_S P + (X_S + X_t) Q = 0 \quad (30)$$

Dari persamaan (29), nilai 't' dapat diperoleh dengan rumus berikut.

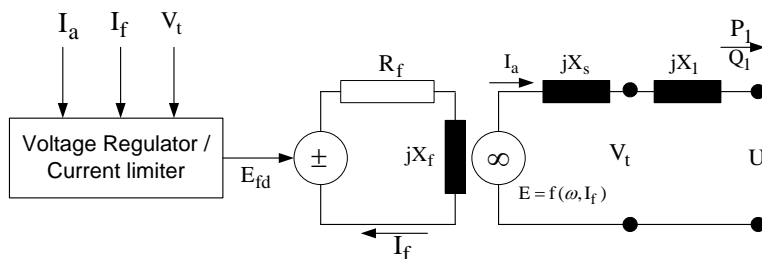
$$t_1 = (V_S V_T + ((V_S V_T)^2 - 4V_T^2 (R_S P + (X_S + X_t) Q))^2 / 2V_T^2 \quad (31)$$

$$t_2 = (V_S V_T + ((V_S V_T)^2 - 4V_T^2 (R_S P + (X_S + X_t) Q))^2 / 2V_T^2 \quad (32)$$

## 2.9. Model Current Limiter

Interaksi antara *current limiter* dan jaringan dapat dijelaskan pada Gambar 10. *Voltage regulator/current limiter* mempunyai tiga mode operasi, yaitu sebagai berikut.

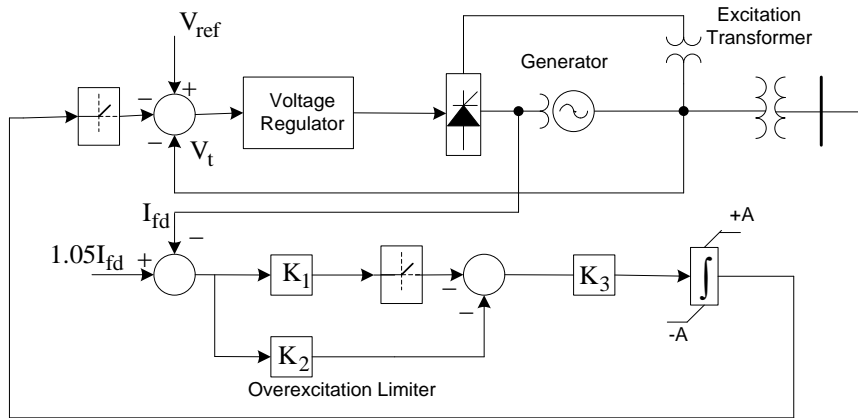
- Mengatur tegangan terminal generator  $V_t$ . Mode ini adalah mode dalam keadaan operasi normal.
- Arus medan  $I_f$  dibatasi untuk mencegah panas berlebih pada belitan medan. Mode ini dirancang untuk menjaga nilai E konstan.
- Arus jangkar  $I_a$  dibatasi untuk mencegah panas berlebih pada belitan jangkar.



**Gambar 10** Model Generator Sinkron yang Terhubung ke Sistem Tenaga

Pada kondisi normal di mana nilai arus medan kurang dari *set point* (biasanya 105% dari nilai nominal arus medan), amplifikasi  $K_1$  dan  $K_2$  akan negatif sehingga integrator akan mengeluarkan *output* -A. Kondisi ini akan membuat *input summing point* bagi *voltage regulator* akan bernilai nol. Jika nilai arus medan lebih tinggi dari nilai *set point*, keluaran

integrator akan menjadi +A dan *voltage regulator* akan mengurangi arus medan. Hal ini dapat dijelaskan pada Gambar 11.



**Gambar 11** Model Field Current Limiting

## 2.10. Modal Analysis

Gao mengusulkan strategi telaah modal dan menerapkannya pada *matriks Jacobian* yang disederhanakan untuk mendapatkan batas stabilitas tegangan dengan faktor partisipasi daya reaktif<sup>f[2]</sup>. Untuk mendapatkan nilai *eigen* terkecil dan *vector eigen* pasangannya digunakan strategi komputasi metode simultan ILSI (*Implicit Inverse Loopsided Simultaneous Iteration*).

Morison dan Kundur menemukan suatu strategi untuk memprediksi terjadinya *voltage collapse* pada suatu sistem, yang disebut *Modal Analysis*. Strategi ini didasarkan pada penghitungan nilai *eigen* minimum dan vektor *eigen* dari matriks Jacobian sistem. Nilai *eigen* dikaitkan dengan bentuk perubahan tegangan dan daya reaktif<sup>f[2]</sup>.

Stabilitas sistem dapat dinilai dengan memeriksa kondisi nilai *eigen* yang ada. Suatu sistem dikatakan stabil jika semua nilai *eigen*-nya positif, dan tidak stabil jika semua nilai *eigen*-nya negatif. Nilai *eigen* nol untuk matriks Jacobian menunjukkan bahwa sistem berada pada batas ketidakstabilan (sistem akan runtuh).

Potensi *voltage collapse* dapat diprediksi dengan mengevaluasi nilai *eigen* terkecil. Nilai *eigen* yang kecil menunjukkan tingkat keruntuhan sistem. Dengan menggunakan faktor partisipasi, bus atau *node* terlemah dapat ditentukan.

*Modal Analysis* sangat bergantung pada matriks *Jacobian* dalam telaah aliran daya. Persamaan aliran daya *Newton-Raphson* adalah sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (33)$$

Dengan asumsi  $\Delta P = 0$ , diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Delta P = 0 &= J_{11} \Delta \theta + J_{12} \Delta V, \\ \Delta \theta &= -J_{11}^{-1} J_{12} \Delta V \end{aligned} \quad (34)$$

dan

$$\Delta Q = J_{21} \Delta \theta + J_{22} \Delta V \quad (35)$$

Substitusikan persamaan (29) dan (30), maka diperoleh persamaan berikut.

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (36)$$

Kemudian diperoleh persamaan berikut.

$$J_R = \begin{bmatrix} J_{22} - J_{21} J_{11}^{-1} J_{12} \end{bmatrix}$$

$J_R$  adalah matriks *Jacobian* Reduksi dari sistem.

Persamaan (25) dapat ditulis menjadi persamaan berikut.

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q \quad (37)$$

Matriks  $J_R$  merepresentasikan hubungan linear antara perubahan tegangan dan perubahan injeksi daya reaktif pada bus.

Nilai *eigen* dan *vector eigen* dari matriks *Jacobian* Reduksi  $J_R$  digunakan untuk menelaah stabilitas tegangan. Ketidakstabilan tegangan

dapat diketahui dari bentuk nilai *eigen* matriks  $J_R$ . Hasil telaah nilai *eigen*  $J_R$  adalah sebagai berikut.

$$J_R = \Phi \Lambda \Gamma \quad (38)$$

Keterangan:

$\Phi$  = Vektor *eigen* sebelah kanan matriks  $J_R$

$\Gamma$  = Vektor *eigen* sebelah kiri matriks  $J_R$

$\Lambda$  = Nilai *eigen* diagonal matriks  $J_R$

Dengan mengubah  $J_R$  menjadi  $J_R^{-1}$  diperoleh persamaan berikut.

$$J_R^{-1} = \Phi \Lambda^{-1} \Gamma \quad (39)$$

Dengan  $\Phi \Gamma = I$

Persamaan (37) dan (39) disubstitusi, diperoleh persamaan berikut.

atau;  $\Delta V = \Phi \Lambda^{-1} \Gamma \Delta Q$

$$\Delta V = \sum_i \frac{\Phi \Gamma}{\lambda_i} \Delta Q \quad (40)$$

Dengan  $\lambda_i$  adalah nilai *eigen* yang ke i.

Akhirnya, diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$\Delta V_{mi} = \frac{1}{\lambda_i} \Delta Q_{mi} \quad (41)$$

Dengan ketentuan sebagai berikut.

1. Jika  $\lambda_i = 0$ , maka tegangan akan *collapse*, karena perubahan daya reaktif akan menyebabkan tegangan berubah tak terhingga.
2. Jika  $\lambda_i > 0$ , maka tegangan sistem stabil.
3. Jika  $\lambda_i < 0$ , maka tegangan sistem tidak stabil.

## 2.11. Neural Network

*Neural network* didasarkan pada prinsip kerja jaringan saraf manusia dalam menerima rangsangan dan menanggapi rangsangan yang diterima sehingga arsitektur *neural network* mirip dengan jaringan saraf manusia<sup>[24]</sup>. Model matematis yang memodelkan sistem jaringan saraf manusia dalam bentuk *neural network* didasarkan pada beberapa asumsi, yaitu sebagai berikut.

1. Pemrosesan informasi terjadi pada elemen prosesor sederhana yang disebut neuron.
2. Sinyal berjalan di antara neuron melalui penghubung.
3. Setiap penghubung memiliki pembobot tertentu, dengan sinyal yang dikirimkan akan dikalikan.
4. Setiap neuron memiliki fungsi aktivasi (biasanya nonlinier) pada *input*-nya untuk menghasilkan sinyal *output*.

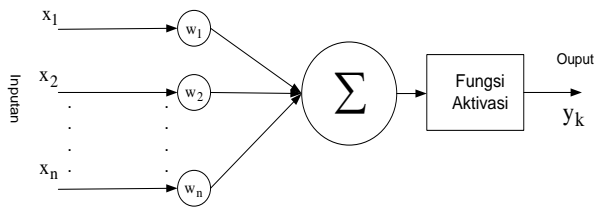
Karakteristik *neural network* ditentukan oleh beberapa hal, yaitu pola koneksi antarneuron (arsitektur), metode penentuan pembobot (algoritma pelatihan atau pembelajaran), dan fungsi aktivasi.

Struktur *neural network* terinspirasi oleh struktur jaringan otak manusia. Tiruan neuron dalam struktur *neural network* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 12 adalah elemen pemroses, seperti halnya neuron. Beberapa sinyal *input*  $x$  dikalikan dengan masing-masing pembobot yang sesuai  $w$ . Kemudian hasil perkalian dijumlahkan, dan *output* dari fungsi aktivasi akan mendapatkan sinyal *output* yaitu  $F(x, W)$ . Kinerja tiruan neuron ini dianggap sama dengan kinerja dari sel biologis yang diketahui saat ini.

Dengan asumsi ada  $n$  sinyal *input* dan  $n$  pembobot, fungsi *output* dari neuron dapat ditulis dalam persamaan berikut.

$$F(x, w) = f(w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_3x_3)$$

Kumpulan neuron dibuat menjadi jaringan yang akan berfungsi sebagai alat komputasi. Jumlah neuron dan struktur jaringan akan berbeda untuk setiap masalah. Demikian pula dengan pembobot setiap neuron, ukurannya ditentukan saat *network* dilatih dengan sekumpulan data sampel<sup>[24]</sup>.



**Gambar 12** Struktur *Neural Network*<sup>[24]</sup>

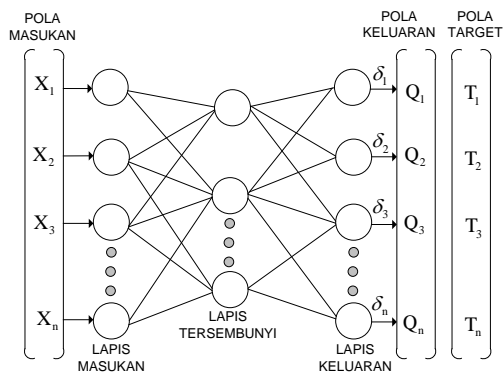
### 2.11.1. Fungsi Aktivasi

Operasi dasar dari *neural network* adalah penjumlahan dari perkalian setiap sinyal *input* dengan pembobotnya, yang kemudian diteruskan ke fungsi transfer (fungsi aktivasi) untuk menghasilkan *output*. Jenis fungsi aktivasi yang umum digunakan adalah fungsi identitas, *step biner*, *sigmoid biner*, dan *sigmoid bipolar*.

### 2.11.2. Pola Koneksi Antar-Neuron (Arsitektur)

Neuron dalam jaringan saraf terhubung satu sama lain melalui struktur tertentu. Arsitektur jaringan saraf yang digunakan adalah jaringan umpan maju banyak lapisan (*multi-layer feed-forward network*).

Dalam struktur ini, ada satu atau beberapa lapisan tersembunyi dengan simpul yang disebut *hidden neuron*. Mereka disebut *hidden* karena lapisan antar-*layer* tidak mempunyai akses langsung ke dunia luar. Contoh struktur seperti itu ditunjukkan pada Gambar 13.



**Gambar 13** Proses Arah Maju<sup>[24]</sup>

Dalam proses pembelajaran, ada bentuk pembelajaran *supervised learning*, dan *unsupervised learning*. Dalam *supervised learning*, vektor *input* akan dipasangkan dengan vektor target untuk menghasilkan *output* yang sesuai dengan target. Vektor *output* yang tidak sama dengan vektor target akan menimbulkan kesalahan. Kesalahan tersebut kemudian digunakan untuk memperbaiki pembobot sehingga dalam proses pembelajaran selanjutnya, vektor *output* sama dengan vektor target. Salah satu bentuk penggunaan *supervised learning* adalah algoritma *backpropagation*.

### 2.11.3. Algoritma *Backpropagation*

*Backpropagation* adalah algoritma pembelajaran terawasi yang memiliki banyak lapisan untuk mengubah bobot yang terhubung ke neuron yang ada di lapisan tersembunyi. Algoritma tersebut menggunakan *output* kesalahan untuk mengubah nilai bobot ke arah mundur. Untuk memperoleh kesalahan ini, tahap perambatan maju harus dilakukan terlebih dahulu.

Algoritma pelatihan *backpropagation* terdiri dari dua tahap, yaitu tahap *feed forward* dan *backpropagation*. Langkah-langkah algoritma tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Proses inisialisasi pembobot (diberikan nilai kecil secara acak)

#### Umpan Maju (*Feedforward*)

2. Setiap unit *input* ( $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ ) menerima sinyal *input*  $x_i$  dan menyebarkan sinyal tersebut ke subunit berikutnya (*hidden layer units*)
3. Setiap unit di lapisan tersembunyi ( $z_j, j = 1, 2, \dots, p$ ) menjumlahkan sinyal *input* berbobot:

$$z_{-in_j} = V_{0j} + \sum_{i=1}^n x_i V_{ij} \quad (42)$$

Kemudian dihitung sesuai dengan fungsi aktivasi yang digunakan:

$$z_j = f(z_{-in_j}) \quad (43)$$

Sinyal *output* dari fungsi aktivasi akan dikirim ke unit di lapisan atasnya (*upper layer*)

4. Setiap unit keluaran ( $Y_k, k = 1, 2, \dots, m$ ) dikalikan dengan penimbang dan dijumlahkan serta ditambah dengan biasnya:

$$Y_{in_k} = w_{ok} + \sum_{j=1}^p Z_j W_{jk} \quad (44)$$

Untuk menghitung sinyal *output*, gunakan fungsi aktivasi:

$$y_k = f(y_{in_k}) \quad (45)$$

### **Back Propagation**

5. Setiap unit *output* ( $Y_k, k = 1, 2, \dots, m$ ) menerima pola target yang berkaitan dengan pola *input* pembelajaran, dengan nilai kesalahan:

$$\delta_k = (t_k - y_k) f'(y_{in_k}) \quad (46)$$

Untuk memperbaiki nilai, hitung koreksi bobot:

$$\Delta W_{kj} = \alpha \cdot \delta_k \cdot Z_j \quad (47)$$

6. Setiap unit lapisan tersembunyi ( $z_j, j = 1, 2, \dots, p$ ) menjumlahkan delta *input* dari unit lapisan di atasnya:

$$\delta_{in_j} = \sum_{k=1}^m \delta_k W_{jk} \quad (48)$$

Kalikan dengan turunan fungsi aktivasi untuk menghitung kesalahan:

$$\delta_{in_j} = \delta_{in_j} \cdot f'(z_{in_j}) \quad (49)$$

Hitung koreksi pembobot:

$$\Delta V_{jk} = \alpha \cdot \delta_j \cdot x_i \quad (50)$$

Untuk memperbaiki  $V_{oj}$ , hitung perbaikan bias (*bias correction*):

$$\Delta V_{oj} = \alpha \delta_j \quad (51)$$

### **Memperbaiki Bobot dan Bias**

7. Setiap unit *output* ( $Y_k, k = 1, 2, \dots, m$ ) diperbaiki bias dan pembobotnya ( $j=0, 1, \dots, p$ )

$$W_{jk}(\text{baru}) = W_{jk}(\text{lama}) + \Delta W_{jk} \quad (52)$$

Setiap unit tersembunyi (*hidden unit*) ( $z_j, j = 1, 2, \dots, p$ ) memperbaiki bias dan pembobotnya ( $i=0, 1, \dots, n$ )

$$V_{jk}(\text{baru}) = V_{jk}(\text{baru}) + \Delta V_{jk} \quad (53)$$

8. Periksa keadaan pemberhentian (akhir iterasi)<sup>[24]</sup>

Dalam tinjauan ini, informasi (data) tegangan, pembebanan, dan nilai indeks *steady state stability* yang diperoleh dari metode *Dimo* akan diajarkan ke *neural network*. Informasi (data) tegangan dan besar beban digunakan sebagai *input*, sedangkan nilai indeks *steady state stability* digunakan sebagai *output*. Kemudian melalui pembelajaran ini akan diperoleh pola *neural network* yang dapat memberikan nilai indeks stabilitas untuk setiap perubahan beban sistem.

Untuk mengetahui pengaruh perubahan indeks stabilitas pada parameter *load characteristic*, *tap changer*, dan *current limiter*, langkah awal adalah memasukkan parameter ini ke dalam model sistem yang disederhanakan menggunakan strategi *Dimo*. Kemudian nilai indeks stabilitas yang diperoleh akan diajarkan ke *neural network*. Model yang diperoleh diharapkan akan dapat diterapkan dalam keadaan *steady state stability monitoring* secara *real time*.

## 2.12. **Extreme Learning Machine (ELM)**

*Extreme Learning Machine* (ELM) adalah strategi pembelajaran baru untuk jaringan saraf tiruan, yang termasuk *Single-hidden Layer Feedforward Neural Networks* (SLFNs)<sup>[37]</sup>. Strategi ini pertama kali diperkenalkan oleh Huang<sup>[38]</sup>.

Huang mengatakan bahwa *feedforward neural networks* banyak digunakan dalam berbagai aplikasi prediktif karena mampu memperkirakan pemetaan nonlinier (*nonlinier mapping*) kompleks langsung dari *input sample* dan mampu menyediakan kelas besar pemodelan untuk fenomena alami dan buatan yang sulit diatasi dengan menggunakan metode parametrik klasik.

Umumnya, semua parameter dalam jaringan umpan-maju perlu diperbaiki, yang mengarah ke hubungan antara parameter di *layer* satu

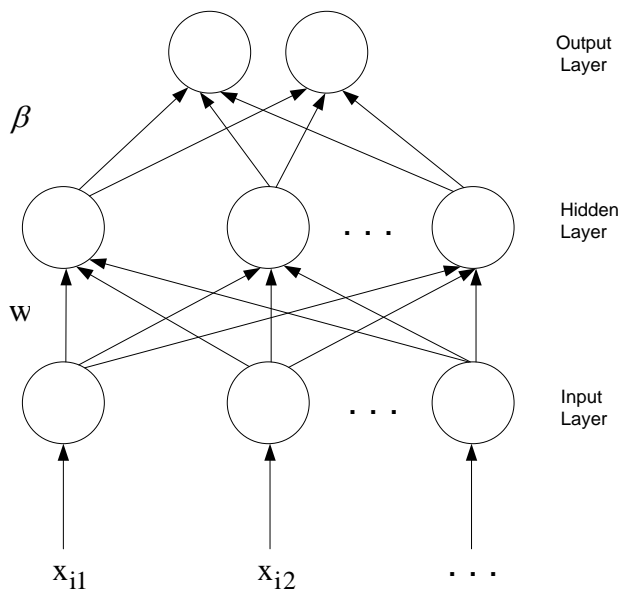
dengan parameter di *layer* lainnya (parameter bobot dan bias). Selama beberapa dekade terakhir, strategi *gradient descent* sudah digunakan dalam berbagai algoritma pembelajaran JST. Namun, strategi tersebut sangat lambat karena langkah pembelajarannya tidak pasti dan mudah terjebak dalam *local minima*. Di samping itu, strategi tersebut juga memerlukan iterasi pembelajaran yang banyak untuk mencapai performa pembelajaran yang baik.

Kelemahan *neural network* adalah kecepatan pembelajarannya yang lambat. Algoritma pembelajaran yang ada seringkali mempunyai kecepatan pembelajaran yang jauh lebih lambat dari yang dibutuhkan. Dengan menggunakan strategi tradisional yang ada saat ini, *training neural network* kadang kala memakan waktu berjam-jam, berhari-hari, atau bahkan lebih lama. Maka dari itu, strategi pembelajaran ELM diciptakan untuk menangani kelemahan jaringan saraf tiruan terutama dalam hal kecepatan pembelajaran yang lambat. Huang *et al.*, mengatakan bahwa JST biasanya mempunyai tingkat pembelajaran yang rendah karena menggunakan algoritma pembelajaran berbasis *slow gradient* untuk pelatihan *neural network*, dan semua parameter dalam jaringan ditentukan secara iteratif dengan menggunakan strategi pembelajaran ini.

Dalam pembelajaran menggunakan algoritma pembelajaran berbasis *slow gradient*, seperti *backpropagation* (BP), dan variannya Lavenberg Marquadt (LM), semua parameter dalam JST *feedforward* harus ditentukan secara manual<sup>[38]</sup>. Parameter ini merupakan bobot *input* dan bias tersembunyi, yang berkorelasi dari satu *layer* ke *layer* lainnya, sehingga memiliki kecepatan pembelajaran yang lama dan kerap terjebak dalam *local minima*<sup>[39]</sup>. Sementara dalam ELM, parameter bobot *input* dan bias tersembunyi dipilih secara acak sehingga ELM mempunyai kecepatan pembelajaran yang cepat dan dapat menghasilkan kinerja generalisasi yang baik.

Tinjauan yang dilakukan oleh Huang menunjukkan bahwa bobot *input* dan bias tersembunyi dalam SLFNs dapat dipilih secara acak jika fungsi aktivasi dalam lapisan tersembunyi ditentukan secara tidak terhingga. Setelah memilih bobot *input* dan bias tersembunyi secara acak, SLFNs dapat secara sederhana dianggap sebagai sistem linier, dan bobot *output* SLFNs (bobot yang menghubungkan lapisan tersembunyi dan

lapisan keluaran) dapat ditentukan melalui penelaahan operasi kebalikan dari matriks *output hidden layer*. Berdasarkan konsep ini, algoritma pembelajaran ini disebut *Extreme Learning Machine* (ELM), yang mempunyai kecepatan pembelajaran ribuan kali lebih cepat dan mencapai kinerja generalisasi yang lebih baik daripada algoritma pembelajaran seperti *backpropagation* (BP). Gambar berikut adalah struktur ELM.



**Gambar 14** Struktur ELM

### 2.12.1 Model Matematis ELM

Untuk  $N$  jumlah representasi (sampel) yang berbeda  $(\mathcal{X}_i, t_i)$  diperoleh persamaan berikut.

$$\mathcal{X}_i = [\mathcal{X}_{i1}, \mathcal{X}_{i2}, \mathcal{X}_{i3}, \dots, \mathcal{X}_{in}]^T \in \mathbb{R}^n \quad (54)$$

$$t_i = [t_{i1}, t_{i2}, t_{i3}, \dots, t_{in}]^T \in \mathbb{R}^m \quad (55)$$

Standar SLFNs dengan jumlah  $\tilde{N}$  *hidden node* dan fungsi aktivasi  $g(x)$  secara matematis dapat ditulis dalam persamaan berikut.

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_i g(w_i \cdot x_i + b_i) = o_j \quad (56)$$

Keterangan:

$$j = 1, 2, \dots, N$$

$w_i = (w_{i1}, w_{i2}, w_{i3}, \dots, w_{im})^T$  adalah vektor bobot yang menghubungkan  $i_{th}$  *hidden node* dan *input node*.

$\beta_i = (\beta_{i1}, \beta_{i2}, \beta_{i3}, \dots, \beta_{im})^T$  adalah vektor bobot yang menghubungkan  $i_{th}$  *hidden node* dan *output node*.

$b_i$  adalah ambang batas dari  $i_{th}$  *hidden node*.

$w_i \cdot x_i$  adalah *inner produk* dari  $w_i$  dan  $x_i$

SLFNs dengan  $\tilde{N}$  *hidden nodes* dan fungsi aktivasi  $g(x)$  diasumsikan dapat mengestimasi  $N$  representasi (sampel) dengan 0 kesalahan, dapat dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$\sum_{j=1}^{\tilde{N}} \|o_j - t_j\| = 0 \text{ sehingga } o_j = t_j \quad (57)$$

$$\sum_{i=1}^{\tilde{N}} \beta_i g(w_i \cdot x_i + b_i) = t_j, \text{ dengan } j = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (58)$$

Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$H \beta = T \quad (59)$$

Keterangan:

$$H (w_1, \dots, w_{\tilde{N}}, b_1, \dots, b_{\tilde{N}}, x_1, \dots, x_N)$$

$$= \begin{bmatrix} g(w_1 \cdot x_1 + b_1) & \dots & g(w_{\tilde{N}} \cdot x_1 + b_{\tilde{N}}) \\ \vdots & \dots & \vdots \\ g(w_1 \cdot x_N + b_1) & \dots & g(w_{\tilde{N}} \cdot x_N + b_{\tilde{N}}) \end{bmatrix}_{N \times \tilde{N}} \quad (60)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_{\tilde{N}}^T \end{bmatrix}_{\tilde{N} \times m} \quad (61)$$

$$T = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ \beta_{\tilde{N}}^T \end{bmatrix}_{N \times m} \quad (62)$$

H pada persamaan (59) adalah matriks keluaran lapisan tersembunyi pada *neural network*. Kolom  $i_{th}$  dari H adalah  $i_{th}$  *hidden node output* yang berkaitan dengan masukan  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ .  $g(w_1 \cdot x_1 + b_1)$  menunjukkan keluaran dari *hidden neuron* yang berkaitan dengan *input*  $x_i$ .  $\beta$  adalah matriks bobot *output* dan T adalah matriks target atau *output*.

Dalam ELM, bobot *input* dan bias tersembunyi diperoleh secara acak tanpa iterasi. Maka dari itu, bobot *input* dapat ditentukan secara sederhana dari  $H\beta = T$ , yaitu dengan solusi *least-square* (LS), nilai yang dihasilkan adalah sebagai berikut.

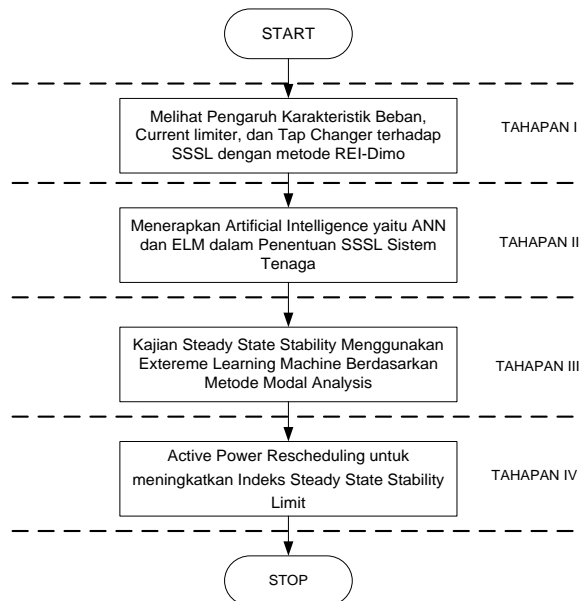
$$\hat{\beta} = H^\dagger T \quad (63)$$

$H^\dagger$  merupakan *Moore-Penrose generalized inverse matrix* H.

# BAB III

## TATA PROSES PENDALAMAN

Tinjauan ini dibagi menjadi beberapa tahap, yaitu menggunakan kombinasi strategi REI-Dimo dan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) untuk mengetahui pengaruh *load characteristic*, *tap changer*, dan *current limiter* terhadap *steady state stability*. Dalam tinjauan ini, AI yang diterapkan adalah *artificial neural network* dan *extreme learning machine*. Selanjutnya akan menelaah *steady state stability* dengan menggunakan strategi stabilitas lainnya, yaitu *Modal Analysis* yang dikombinasikan dengan *extreme learning machine*. Dan tahap terakhir adalah mengusulkan strategi untuk penataan ulang daya aktif (*rescheduling active power*) untuk meningkatkan *steady state stability*.



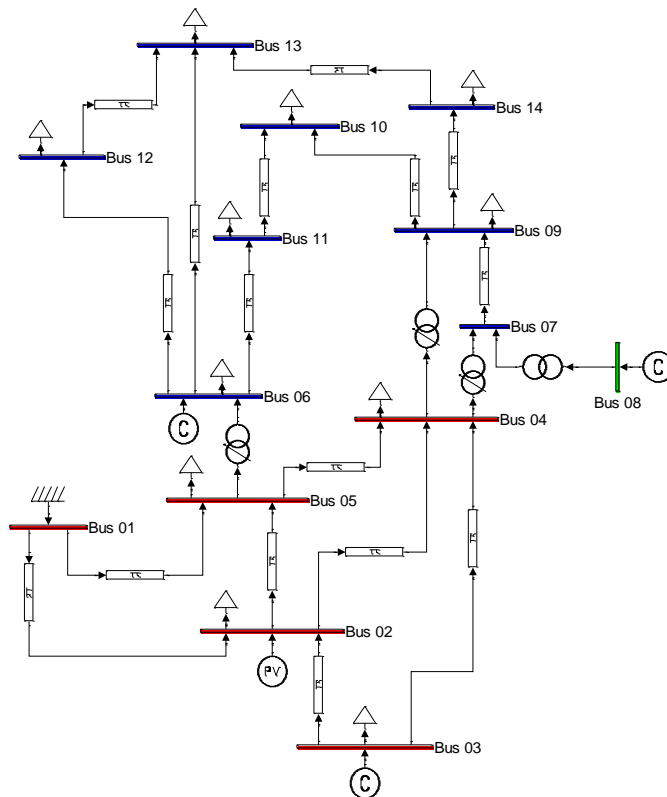
**Gambar 15** Tahap Peninjauan

Pada tinjauan ini, sistem tenaga listrik yang digunakan sebagai *test case* adalah Sistem IEEE 14 bus, Sistem Interkoneksi Jawa-Bali 500 Kv, dan Sistem Interkoneksi Sulseltrabar.

### 3.1. Informasi Sistem Tenaga

#### 3.1.1. Sistem IEEE 14 Bus

Sistem IEEE 14 bus merupakan salah satu sistem yang digunakan sebagai *test case*, yang dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 16** Diagram Garis Tunggal Sistem IEEE 14 Bus

**Tabel 2** Informasi Generator dan Beban IEEE 14 Bus

Bus No.	Bus Code	Voltage Mag.	Angle Degree	Load		Generator				Static MVAR +Qc/-Ql'
				MW	MVAR	MW	MVAR	Q min	Q max	
1	1	1.05	0	0	0	232.4	-16.9	0	0	0
2	2	1.045	-4.98	21.7	12.7	40	42.4	50	-40	-10
3	2	1.01	-12.72	94.2	19	0	23.4	40	0	0
4	0	1.019	-10.33	47.8	-3.9	0	0	0	0	0
5	0	1.02	-8.78	7.6	1.6	0	0	0	0	0
6	2	1.07	-14.22	11.2	7.5	0	12.2	24	-6	-6
7	0	1.062	-13.37	0	0	0	0	0	0	0
8	2	1.09	-13.36	0	0	0	17.4	24	-6	-10
9	0	1.056	-14.94	29.5	16.6	0	0	0	0	0.19
10	0	1.051	-15.1	9	5.8	0	0	0	0	0
11	0	1.057	-14.79	3.5	1.8	0	0	0	0	-6
12	0	1.055	-15.07	6.1	1.6	0	0	0	0	0
13	0	1.05	-15.16	13.5	5.8	0	0	0	0	0
14	0	1.036	-16.04	14.9	5	0	0	0	0	0

**Tabel 3** Informasi Saluran IEEE 14 Bus

From Bus	To Bus	R (p.u)	X (p.u)	1/2 B (pu)
1	2	0.01938	0.05917	0.0264
1	5	0.05403	0.22304	0.0246
2	3	0.04699	0.19797	0.0219
2	4	0.05811	0.17632	0.0187
2	5	0.05695	0.17388	0.017
3	4	0.06701	0.17103	0.0173
4	5	0.01335	0.04211	0.0064
4	7	0	0.20912	0
4	9	0	0.55618	0
5	6	0	0.25202	0
6	11	0.09498	0.1989	0
6	12	0.12291	0.25581	0
6	13	0.06615	0.13027	0
7	8	0	0.17615	0
7	9	0	0.11001	0
9	10	0.03181	0.0845	0
9	14	0.12711	0.27038	0
10	11	0.08205	0.19207	0
12	13	0.22092	0.19988	0
13	14	0.17093	0.34802	0

### 3.1.2. Sistem Interkoneksi Jawa-Bali 500 kV

Diagram garis tunggal sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV ditunjukkan pada Gambar 17, dengan informasi operasi pembangkit dan saluran transmisi ditunjukkan pada Tabel 4–5.

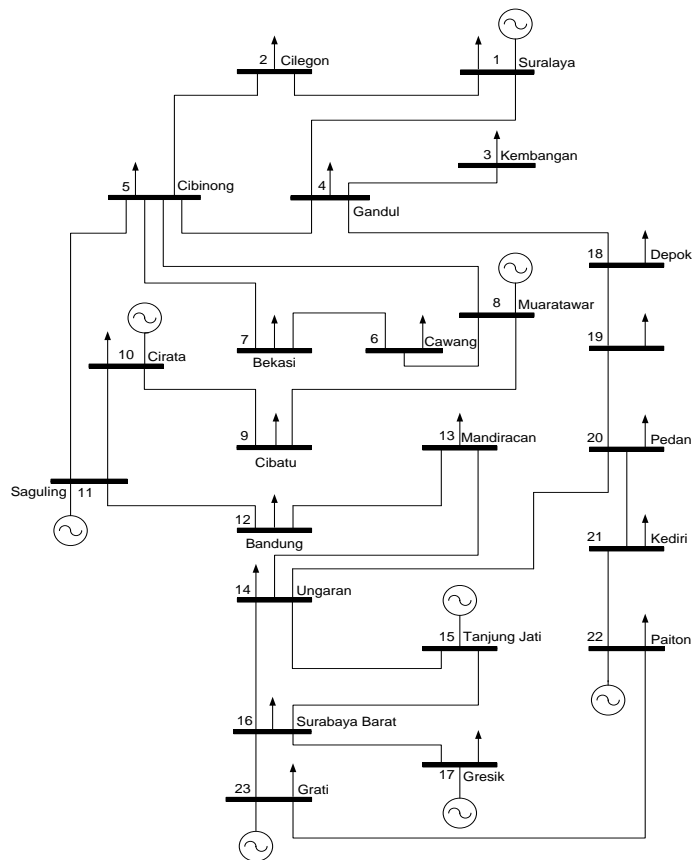
**Tabel 4** Informasi Pembangkitan Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali

No Bus	Nama Bus	Jenis Bus	Tegangan		Beban	
			Besar	Sudut	MW	MVAR
1	Suralaya	Slack	1,02	0	146	43
2	Cilegon	Beban	1	0	672	217
3	Kembangan	Beban	1	0	727	249
4	Gandul	Beban	1	0	521	174
5	Cibinong	Beban	1	0	667	206
6	Cawang	Beban	1	0	727	174
7	Bekasi	Beban	1	0	618	163
8	Muara Tawar	Generator	1	0	0	0
9	Cibatu	Beban	1	0	787	304
10	Cirata	Generator	1	0	651	234
11	Saguling	Generator	1	0	0	0
12	Bandung Selatan	Beban	1	0	564	336
13	Mandiracan	Beban	1	0	380	130
14	Ungaran	Beban	1	0	314	347
15	Tanjung Jati	Generator	1	0	0	0
16	Surabaya Barat	Beban	1	0	824	304
17	Gresik	Generator	1	0	201	87
18	Depok	Beban	1	0	0	0
19	Tasikmalaya	Beban	1	0	265	16
20	Pedan	Beban	1	0	501	233
21	Kediri	Beban	1	0	343	197
22	Paiton	Generator	1	0	803	260
23	Grati	Generator	1	0	125	184

**Tabel 5** Informasi Saluran Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	2	0,000626496	0,007008768	0
1	4	0,006513273	0,062576324	0,0119796400
2	5	0,013133324	0,146925792	0,0070611410
3	4	0,001513179	0,016928309	0
4	5	0,001246422	0,011975010	0
4	18	0,000694176	0,006669298	0
5	7	0,004441880	0,042675400	0
5	8	0,006211600	0,059678000	0
5	11	0,004111380	0,045995040	0,0088419460
6	7	0,001973648	0,018961840	0
6	8	0,005625600	0,054048000	0
8	9	0,002822059	0,027112954	0
9	10	0,002739960	0,026324191	0
10	11	0,001474728	0,014168458	0
11	12	0,001957800	0,021902400	0
12	13	0,006990980	0,067165900	0,0128582700

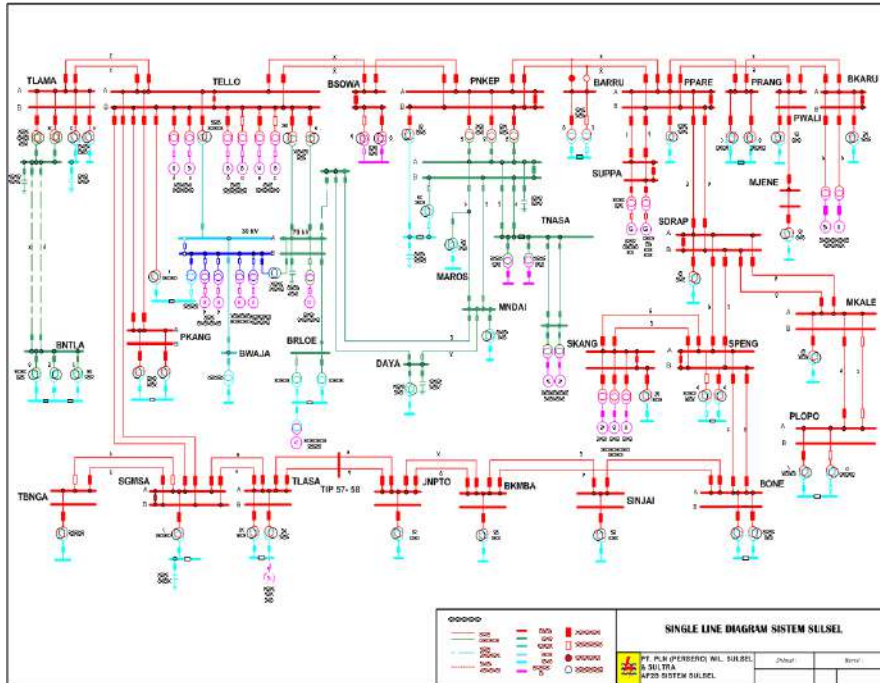
Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)
13	14	0,013478000	0,129490000	0,0247896240
14	15	0,013533920	0,151407360	0,0072765220
14	16	0,015798560	0,151784800	0,0072644380
14	20	0,009036120	0,086814600	0
15	16	0,037539629	0,360662304	0,0172613390
16	17	0,001394680	0,013399400	0
16	23	0,003986382	0,044596656	0
18	19	0,014056000	0,157248000	0,0302288740
19	20	0,015311000	0,171288000	0,0329278810
20	21	0,010291000	0,115128000	0,0221318550
21	22	0,010291000	0,115128000	0,0221318550
22	23	0,004435823	0,049624661	0,0095396930



**Gambar 17** Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa Bali

### 3.1.3. Sistem Interkoneksi Sulseltrabar

Sistem interkoneksi Sulseltrabar beroperasi pada 150 kV, 70 kV, dan sebagian 30 kV, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 18** Diagram Garis Tunggal Sistem Sulseltrabar (sumber: PLN AP2B Sistem Sulseltrabar)

**Tabel 6** Informasi Operasi Sistem Sulseltrabar

No Bus	Nama Bus	Tegangan (pu)	Generator		Beban	
			P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q (pu)
1	Bakaru	1.034	1.257	-0.017	0.034	0.002
2	Barangloe	1	0.187	-0.006	-	-
3	Barru	1	-	-	0.0386	0.012
4	Bone	1	-	-	0.168	0.063
5	Bontoala	1	-	-	0.299	-
6	Bosowa	1	-	-	0.127	-
7	Bulukumba	1	-	-	0.135	0.021
8	Daya	1	-	-	0.204	0.029
9	Jenepono	1	-	-	0.116	0.013

10	Majene	1.02667	0.023	-	0.11	0.005
11	Makale	1.00667	0.023	0.0028	0.07	0.005
12	Mandai	1	-	-	0.14	0.02
13	Maros	1	-	-	0.053	0.0141
14	Palopo	0.99333	0.0635	0.018	0.213	0.022
15	Panakukang	1	-	-	0.405	0.127
16	Pangkep 150 kV	1	-	-	0.125	0.055
17	Pangkep 70 kV	1	-	-	-	-
18	Pare-pare	1	-	-	0.112	0.035
19	Pinrang	1	0.0066	-	0.136	0.034
20	Polmas	1	-	-	0.098	0.032
21	Sengkang	1	1.961	0.092	0.15	0.078
22	Sidrap	1	-	-	0.135	0.09
23	Sinjai	1	-	-	0.128	-
24	Soppeng	1	-	-	0.092	0.047
25	Sungguminasa	1	-	-	0.158	0.005
26	Suppa	1	0.47	0.16	-	-
27	Tallasa	1	-	-	0.145	0.045
28	Tanjung bunga	1	-	-	0.196	0.088
29	Tello 150 kV	0.96666	0.53	0.34	-	-
30	Tello 30 kV A	1	-	-	-	-
31	Tello 30 kV B	1	0.102	0.022	-	-
32	Tello 70 kV	1	-	-	-	-
33	TLama 150 kV	1	-	-	0.317	0.038
34	TLama 70 kV	1	-	-	-	-
35	Tonasa	1	-	-	0.212	0.124

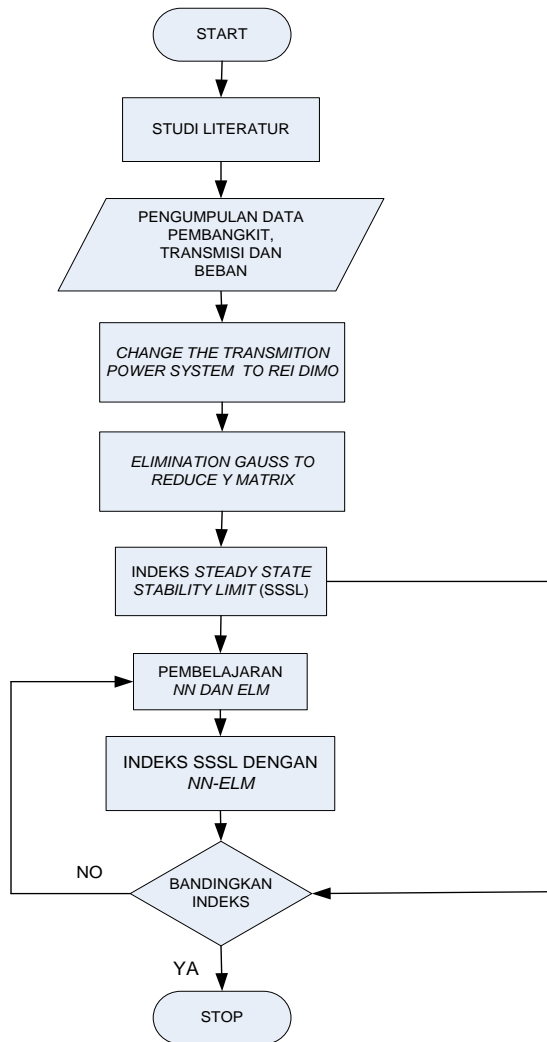
**Tabel 7** Informasi Transmisi Sistem Sulseltrabar

No Bus	Dari Bus	Ke Bus	Total Impedansi Saluran (pu)		
			Urutan Positif		Y/2
			R	jX	
1	Bakaru	Pinrang	0.03076	0.11023	0.01012
2	Bakaru	Polmas	0.02627	0.09440	0.00743
3	Barangloe	Tello 70 kV	0.06069	0.11141	0.00034
5	Barru	Pangkep 150 kV	0.02419	0.08667	0.01167
6	Barru	Pare-pare	0.02314	0.08290	0.01116
7	Bone	Bulukumba	0.07195	0.25851	0.02035
8	Bone	Sinjai	0.04064	0.14603	0.01149
9	Bone	Soppeng	0.02289	0.08153	0.00804
10	Bontoala	TLama 70 kV	0.02023	0.03714	0.00011
11	Bosowa	Pangkep 150 kV	0.01090	0.03919	0.00493
12	Bosowa	Tello 150 kV	0.01683	0.06049	0.00761
13	Bulukumba	Jeneponto	0.02431	0.08733	0.00687
14	Bulukumba	Sinjai	0.03131	0.11249	0.00885
15	Daya	Mandai	0.03420	0.06278	0.00019

No Bus	Dari Bus	Ke Bus	Total Impedansi Saluran (pu)		
			Urutan Positif		Y/2
			R	jX	
16	Daya	Tello 70 kV	0.02408	0.04421	0.00013
17	Jeneponto	Tallasa	0.03333	0.11974	0.00942
18	Majene	Polmas	0.02630	0.09451	0.00744
19	Makale	Palopo	0.01959	0.07038	0.00554
20	Makale	Sidrap	0.03137	0.18876	0.02406
21	Mandai	Pangkep 70 kV	0.18159	0.33335	0.00100
22	Mandai	Tello 70 kV	0.05828	0.10699	0.00032
23	Mandai	Maros	0.13631	0.25024	0.00075
24	Maros	Pangkep 70 kV	0.08188	0.15032	0.00045
25	Panakukang	Tello 150 kV	0.00236	0.00848	0.00067
26	Pangkep 150 kV	Pangkep 70 kV	0.00000	0.13164	0.00000
27	Pangkep 150 kV	Pare-pare	0.04732	0.16958	0.02283
28	Pangkep 150 kV	Tello 150 kV	0.02382	0.08535	0.01149
29	Pangkep 70 kV	Tonasa	0.01638	0.03006	0.00009
30	Pare-pare	Pinrang	0.01388	0.04974	0.00670
31	Pare-pare	Polmas	0.03663	0.13159	0.01819
32	Pare-pare	Sidrap	0.01002	0.03599	0.00283
33	Pare-pare	Suppa	0.00393	0.01413	0.00111
34	Sengkang	Soppeng	0.01053	0.06335	0.00807
35	Sidrap	Soppeng	0.02821	0.10138	0.00964
36	Sungguminasa	Tallasa	0.00485	0.03324	0.00627
37	Sungguminasa	Tanjung bunga	0.00354	0.02128	0.00271
38	Sungguminasa	Tello 150 kV	0.00192	0.01318	0.00249
39	Tello 150 kV	Tello 30 kV A	0.00000	0.55350	0.00000
40	Tello 150 kV	Tello 70 kV	0.00000	0.20794	0.00000
41	Tello 150 kV	TLama 150 KV	0.00363	0.01300	0.00175
42	Tello 30 kV B	Tello 70 kV	0.00000	0.55350	0.00000
43	TLama 150 kV	TLama 70 kV	0.00000	0.20794	0.00000

### 3.2. Tata Pelaksanaan Peninjauan

Peninjauan ini dimulai dengan telaah literatur, mengumpulkan informasi semua parameter sistem, termasuk informasi pembangkit, transmisi, dan beban. Kemudian transmisi diubah menjadi bentuk REI net. Strategi Dimo digunakan untuk mengubah sistem transmisi dengan banyak bus menjadi satu bus beban. Strategi ini dipilih karena lebih memperhatikan pengaruh model generator dalam penyelesaiannya. Nilai internal reaktansi generator ( $X_d'$ ,  $X_d''$ ,  $X_d$ ) sudah dimasukkan ke dalam telaah *steady state stability*. Nilai *internal generator* pada model penentuan stabilitas lain seperti strategi Load Flow dan *Continuation Load Flow* (CPF) tidak diperhitungkan<sup>[7]</sup>.



**Gambar 19** Tata Pelaksanaan Peninjauan Awal

Kemudian beban pada sistem diubah menjadi admitansi konstan. Proses eliminasi Gauss dilakukan untuk menghilangkan bus yang tidak ditelaah. Oleh karena itu, bus yang tersisa hanya bus yang batas stabilitas *steady state* sistemnya akan ditelaah. Pengaruh *load characteristic*, *tap changer*, dan *current limiter* akan dimasukkan dalam tinjauan ini dengan menambahkan model tersebut pada bus yang tersisa dari eliminasi Gauss.

Untuk mengimplementasikan pemodelan ini dengan lebih baik dalam aplikasi stabilitas *steady state* secara *real-time*, dalam tinjauan ini akan ditelaah penerapan *neural network* dan *extreme learning machine*.

Informasi dari perubahan tegangan pusat beban ke perubahan beban sistem dan nilai indeks stabilitas yang diperoleh dari strategi *Dimo* akan diajarkan ke *neural network* dan *extreme learning machine*.

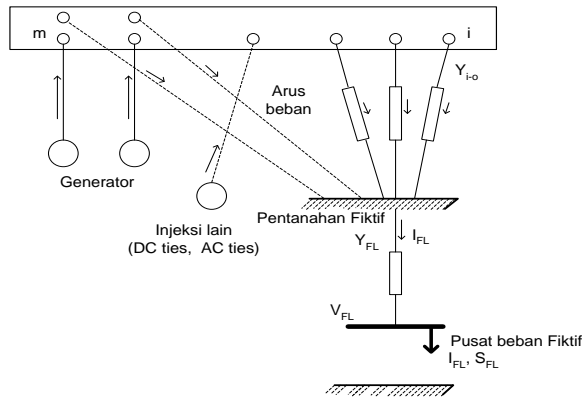
### 3.2.1. Persamaan REI-Dimo<sup>[7]</sup>

Sistem tenaga meliputi subsistem linier dan subsistem nonlinier. Subsistem linier mencakup saluran transmisi, transformator, reaktor, kapasitor, dan admitansi bus ke tanah (jalur pengisian daya dan tap transformator). Sementara subsistem nonlinier meliputi generator, beban, dan kapasitor sinkron. Bus dapat dibagi menjadi bus *non-essential*, yaitu bus yang harus dihilangkan, dan *bus essential*, yaitu bus yang harus tetap tidak berubah.

Jaringan transmisi tidak dapat dikurangi dengan menerapkan transformasi star-delta karena sifat nonlinier dari bus injeksi daya MW dan MVAR. Secara umum, model yang setara harus memenuhi persyaratan berikut.

1. Berdasarkan batas-batasnya, ekuivalen harus akurat dan terpercaya mewakili perilaku sistem tenaga;
2. Model reduksi harus sedekat mungkin dengan karakteristik fisik sistem tenaga;
3. Ekuivalen harus sesuai dengan prosedur komputasi yang digunakan untuk menyelesaikan masalah *subsequent*; dan
4. Ekuivalen harus menjamin solusi matematis yang layak.

Di antara berbagai solusi yang diusulkan dalam literatur, strategi REI-*Dimo* menonjol karena konsepnya yang sangat unik untuk linierisasi jenis injeksi yang sama dengan mengganti jaringan transmisi dengan admitansi konstan, dan kemudian membagi jaringan transmisi ke dalam *single* injeksi nonlinier diterapkan ke bus imajiner yang bernama REI bus. Proses ini memungkinkan untuk mengenalkan jaringan fiktif antara bus yang akan dihilangkan dan bus REI fiktif, yang linier, tanpa kerugian dan dapat dihilangkan dengan reduksi Gaussian. Jaringan ini disebut *zero power balance network* dan merupakan konsep utama dalam REI-*Dimo*.



**Gambar 20** Zero Power Balance Network [7]

Paul Dimo memperkenalkan *zero power balance network*, yang bertujuan untuk menggabungkan sistem beban ke pusat beban tunggal fiktif dengan tetap menjaga karakteristik dan keseimbangan daya dasar. Dalam industri, strategi ini dikenal sebagai REI, dan telah terbukti akurat beban masing-masing bus bervariasi dengan beban total sistem. Gambar 20 menunjukkan contoh langkah demi langkah numerik yang mengilustrasikan proses pembangunan *zero power balance network*.

Sifat radial REI memenuhi salah satu aturan untuk stabilitas *steady state* (stabilitas tegangan) dari penerapan daya reaktif. Untuk sistem dari  $1, \dots, i, \dots, G$  generator, kondensator sinkron dan injektif aktif seperti DC ties atau AC ties, terhubung secara radial ke salah satu bus beban fiktif atau aktual melalui admitansi  $Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_G$ , Dimo mengembangkan rumus berikut.

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} - 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{load} \right) V \quad (64)$$

Dengan:

$E_m$  = Tegangan internal mesin (diasumsikan konstan, tidak terpengaruh oleh perubahan kecil yang dilakukan dalam keadaan stabilitas *steady state*)

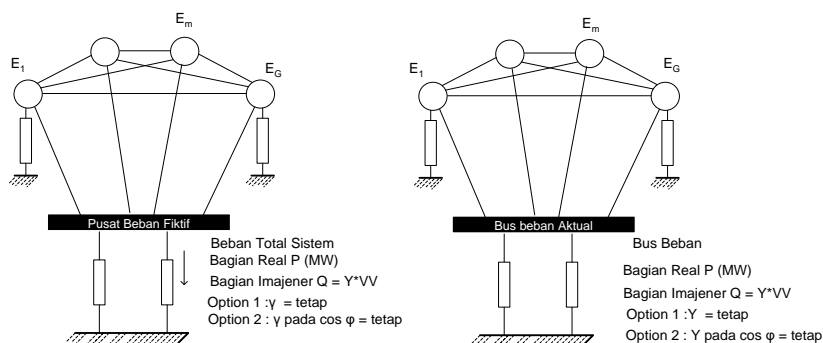
$\delta_m$  = sudut internal mesin dengan mengacu pada tegangan  $V$  bus beban (fiktif dan aktual)

Dalam strategi ini, bagian nyata diwakili oleh nilai MW, sementara bagian reaktif bervariasi dengan kuadrat tegangan menurut rumus berikut.

$$Y_{load} = \frac{Q_{load}}{V^2} \quad (65)$$

Nilai  $Q_{load}$  diambil dari kasus dasar atau dihitung ulang pada setiap langkah dengan memperhatikan struktur beban konstan,  $\cos \phi$  tetap, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 21. Rumusan umum kriteria ini telah dikembangkan dalam<sup>[10]</sup> dan diberikan dalam persamaan berikut.

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos(\delta_m + \gamma_m)} - 2 \left( \sum_m Y_m \cos \gamma_m + Y_{load} + Y^\gamma \right) V \quad (66)$$



**Gambar 21** REI untuk Pusat Beban Fiktif (Kiri) dan untuk Bus Beban Aktual (Kanan)<sup>[7]</sup>

### 3.2.2. Radial Equivalent Independent (REI) Dimo

Prosedur reduksi jaringan sistem tenaga yang diterapkan ditunjukkan pada Gambar 22, sebagai berikut.

1. Informasi (data) sistem tenaga
2. Menjalankan *load flow* untuk memperoleh tegangan dan sudut tegangan
3. Menentukan bus beban
4. Menentukan bus netral fiktif

5. Menghubungkan bus beban ke bus netral fiktif dengan admitansi Y

bus konstan. Persamaan Y bus konstan yaitu  $Y_{bus} = \frac{P + jQ}{V^2}$

dengan:

P = daya aktif

Q = daya reaktif

V = tegangan bus

6. Menentukan arus I dari bus beban ke bus netral fiktif dengan

persamaan  $I = \left( \frac{S_{in}^*}{E_i - jF_i} \right)$

dengan:

$S_{in}^*$  = Daya nyata konjuktif dari bus I ke bus netral fiktif

$E_i$  = Tegangan aktif bus i ( $E_i = V \cos \alpha$ )

$F_i$  = Tegangan reaktif bus i ( $E_i = V \sin \alpha$ )

7. Menentukan bus pusat beban  
 8. Menggunakan hukum Kirchhoff untuk mengetahui arus yang mengalir ke bus pusat beban  
 9. Menghitung daya yang menuju ke bus netral fiktif  
 10. Menentukan nilai impedansi  $Z_{lc}$  dari bus netral fiktif ke bus pusat

beban dengan persamaan  $R_{lc} + jX_{lc} = \left( \frac{P + jQ}{I \times I^*} \right)$

dengan:

$Z_{lc}$  = impedansi *load center*

$R_{lc}$  = resistansi *load center*

$X_{lc}$  = reaktansi *load center*

$I_{lc}$  = arus *load center*

11. Impedansi  $Z_{lc}$  diubah menjadi admitansi  $Y_{lc}$   
 12. Menentukan tegangan di *load center* dengan persamaan

$$V_{lc} = \frac{S_{lc}}{I_{lc}^*}$$

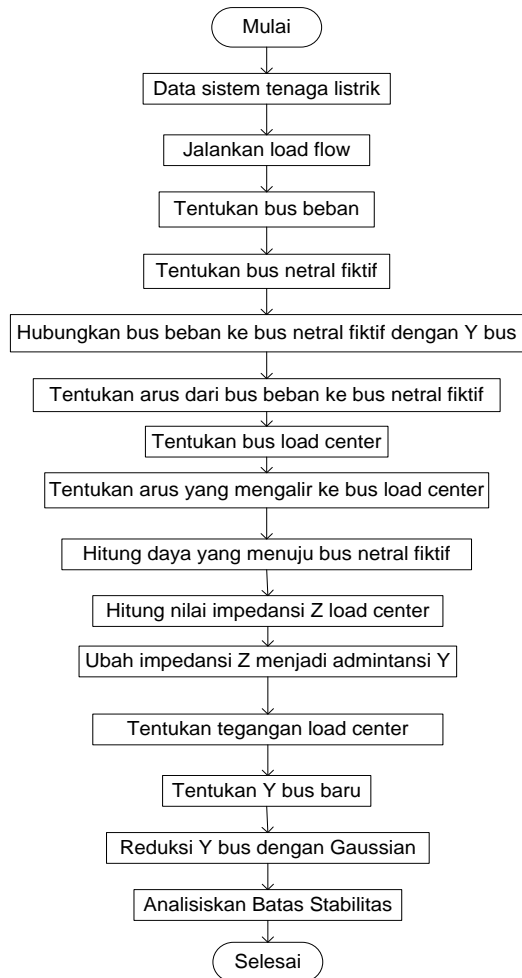
dengan:

$V_{lc}$  = tegangan *load center*

$S_{lc}$  = daya nyata *load center*

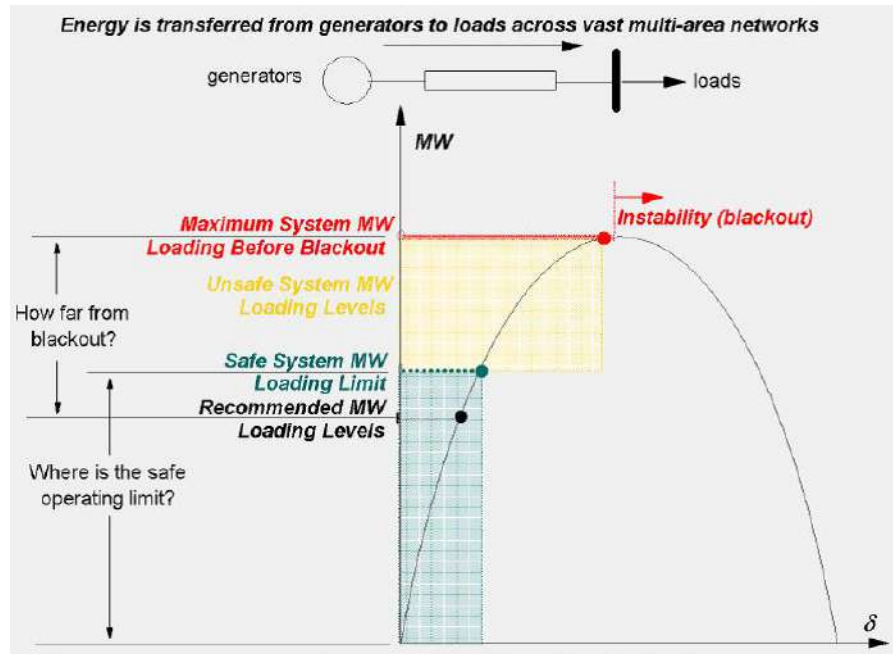
$I_{lc}$  = arus *load center*

13. *Load flow* dijalankan untuk menghasilkan admitansi Y bus baru
14. Matriks Y direduksi dengan Gaussian
15. Batas stabilitas *steady state* dan batas aman untuk tinjauan stabilitas transien ditelaah.



**Gambar 22** Blok Diagram dari Strategi yang Akan Digunakan

Besarnya daya yang dapat disalurkan dari pembangkit ke beban tergantung dari nilai transfer  $X$ . Semakin besar daya yang disalurkan, semakin rendah batas stabilitasnya. Gambar berikut menunjukkan konsep distribusi daya.

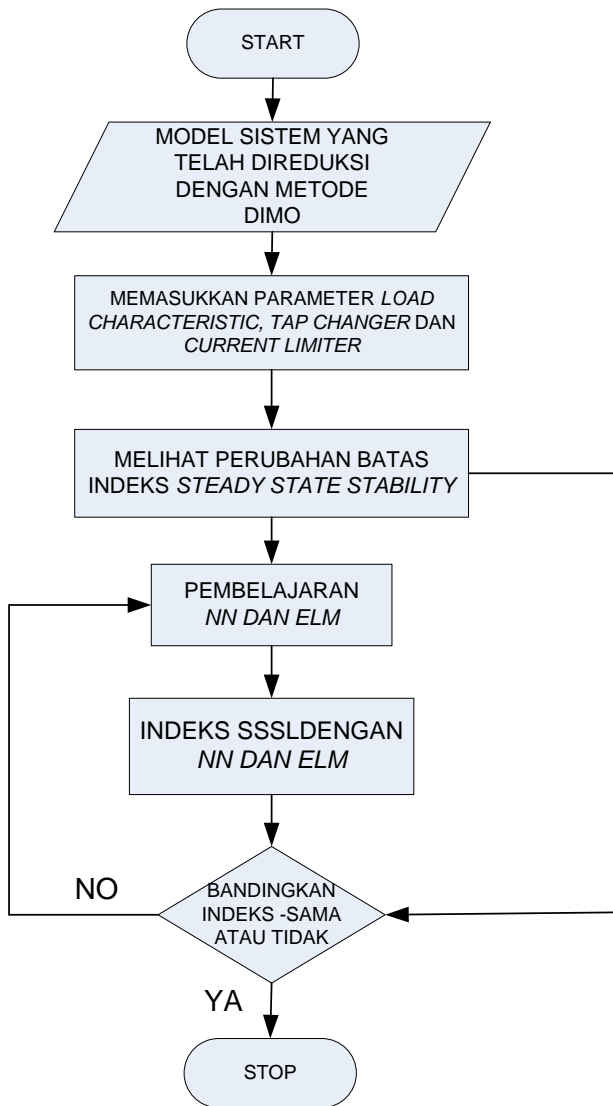


**Gambar 23** Hubungan Transfer Daya dan Batas Stabilitas<sup>[7]</sup>

### 3.3. Konsep Model Beban

Dalam tinjauan stabilitas dan aliran daya, karakteristik beban dimodelkan untuk mempermudah penelaahan. Beban gardu induk biasanya meliputi trafo *step up*, *feeder* subtransmisi, *feeder* distribusi, trafo distribusi, *voltage regulator*, dan peralatan kompensasi daya reaktif.

Model beban umumnya dibagi menjadi dua kategori, yaitu model statis dan model dinamis. Dalam tinjauan ini, pengaruh *load characteristic*, *tap changer*, dan *current limiter* akan dimasukkan dalam menentukan batas stabilitas *steady state*. Gambar 24 menggambarkan tata pelaksanaan peninjauan selanjutnya setelah ketiga parameter tersebut dimasukkan ke dalam sistem.



**Gambar 24** Tata Pelaksanaan Peninjauan Setelah *Load Characteristic*, *Tap Changer* dan *Current Limiter* Dipertimbangkan

Model beban statis menggambarkan perilaku beban dalam kondisi waktu tertentu sebagai fungsi dari *magnitude voltage* dan frekuensi sesaat. Komponen daya aktif dan komponen daya reaktif dianggap terpisah.

Pemodelan beban merupakan tinjauan yang sangat penting dalam telaah sistem tenaga dan kendali. Model beban yang akurat akan berdampak signifikan pada fleksibilitas operasi dan penentuan biaya sistem tenaga. Model beban memiliki tiga bagian utama, yaitu model ZIP (polinomial), model eksponensial, dan kombinasi model ZIP dan eksponensial.

### 3.3.1. Model Polinomial (ZIP)

Salah satu model representasi beban tertua adalah model polinomial. Model ini merupakan gabungan dari admitansi konstan (Z), arus konstan (I), dan daya konstan (P), yang sering disebut model ZIP<sup>[3]</sup>.

$$P = P_0 [p_1 \bar{V}^2 + p_2 \bar{V} + p_3] \quad (67)$$

$$Q = Q_0 [q_1 \bar{V}^2 + q_2 \bar{V} + p_3] \quad (68)$$

Dengan,  $\bar{V} = \frac{V}{V_0}$

Parameter model adalah koefisien  $p_1$  hingga  $p_3$  and  $q_1$  hingga  $q_3$ , yang ditentukan berdasarkan nilai proporsional masing-masing komponen.

### 3.3.2. Model Eksponensial

Tegangan bergantung pada karakteristik beban dan ditulis sebagai model eksponensial berikut.

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^\alpha \quad (69)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^\beta \quad (70)$$

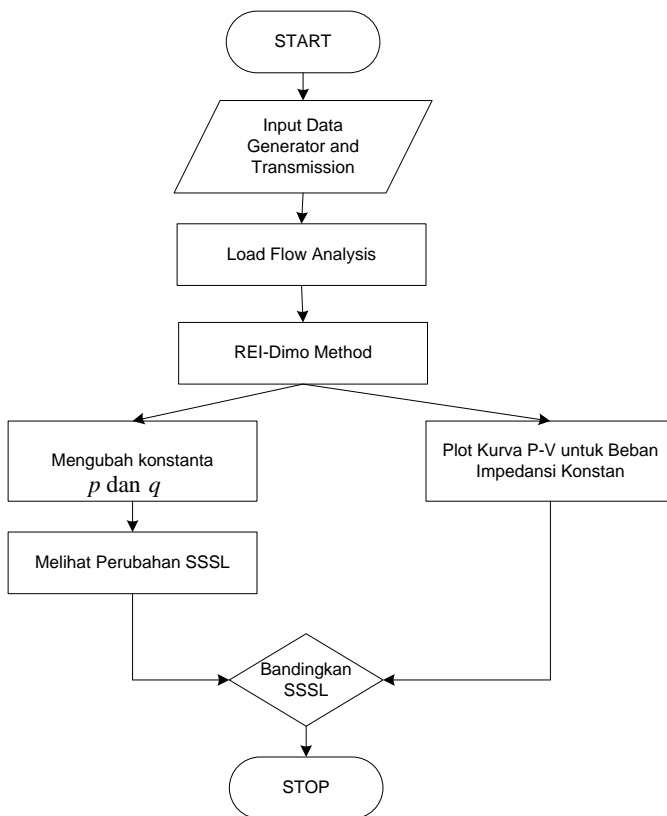
P dan Q masing-masing adalah daya aktif dan reaktif beban pada nilai tegangan V. Subskrip o menunjukkan nilai pada keadaan operasi awal.

### 3.3.3. Model Eksponensial-Zip

Model ini merupakan kombinasi dari strategi eksponensial dan strategi ZIP.

### 3.4. Tata Pelaksanaan Peninjauan Pengaruh Karakteristik Beban terhadap Fenomena *Voltage Collapse*

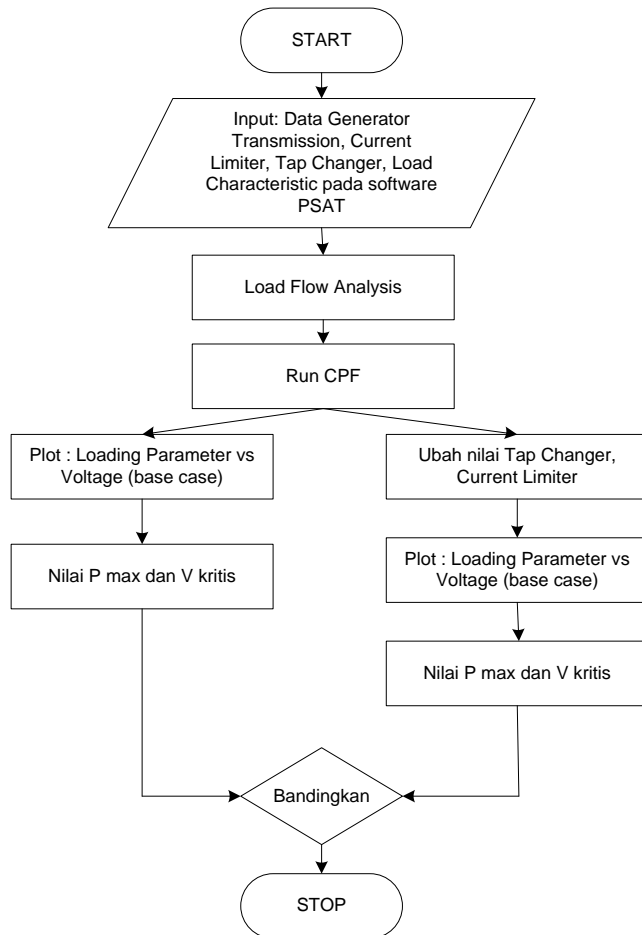
Karakteristik beban merupakan salah satu faktor yang berpengaruh terhadap stabilitas tegangan sistem. Tinjauan yang penulis lakukan adalah menelaah pengaruh pembebanan ZIP terhadap stabilitas tegangan. Strategi *Dimo* digunakan untuk memodelkan sistem agar lebih sederhana. Kemudian, kurva PV digunakan untuk menggambarkan hubungan antara tegangan dan daya dalam sistem. Di samping itu, tinjauan ini juga menelaah pengaruh nilai koefisien  $p_1$  hingga  $p_3$  dan  $q_1$  hingga  $q_3$  terhadap perubahan batas beban maksimum atau *steady state stability limit*.



**Gambar 25** Tata Pelaksanaan Peninjauan Pengaruh *Load Characteristic* terhadap Nilai SSSL Sistem

### 3.5. Tata Pelaksanaan Pengaruh *Tap Changer*, *Load Characteristic*, dan *Current Limiter* pada *Steady State Stability*

Alur peninjauan untuk mengetahui pengaruh *tap changer*, *load characteristic*, dan *current limiter* pada *steady state stability* dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 26** Tata Pelaksanaan Peninjauan Pengaruh *Tap Changer*, *Load Characteristic*, dan *Current Limiter* pada *Steady State Stability*

### 3.6. Tata Pelaksanaan *Steady State Stability Limit* Menggunakan *Artificial Neural Network (ANN)* untuk Sistem Jawa-Bali

Sejumlah referensi menggambarkan strategi dalam tinjauan *steady state* yang dikembangkan oleh Paul Dimo, misalnya buku dan makalah Dimo sendiri. Untuk menghindari tumpang tindih dengan materi yang diterbitkan, bagian ini secara singkat membahas aspek penting dari strategi dan menyoroiti asumsi yang memberikan kecepatan komputasi dengan tetap mempertahankan presisi dan akurasi. Pembaca yang berorientasi pada teori diarahkan untuk meninjau referensi<sup>[1,6]</sup>, di mana strategi Dimo dibahas secara rinci dan mendalam, termasuk bentuk umum formulasi Dimo mengenai kriteria *reactive-power steady-state stability*. Singkatnya, strategi Dimo didasarkan pada transformasi arus hubung singkat jaringan, strategi penyeimbangan daya jaringan untuk mengubah beban sistem menjadi pusat beban fiktif, model generator sederhana, kriteria stabilitas *steady state* (tegangan) untuk daya reaktif, dan penekanan pada penentuan keadaan terburuk sistem bukan dengan perhitungan *load-flow* berulang.

Untuk menyederhanakan, rumus pada persamaan (64) dipisah menjadi dua bagian, yaitu sebagai berikut.

$$D = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} \quad \text{dan} \quad E = 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{\text{load}} \right) V \quad (71)$$

Hubungan antara faktor ekonomi dan nilai indeks kestabilan dapat dilihat dari nilai  $\frac{d\Delta Q}{dV}$ . Nilai ini akan berubah jika parameter  $V$  and  $\cos \delta_m$  juga berubah. Semakin dekat jarak pembangkit yang memberi daya ke beban, semakin tinggi pula nilai  $\cos \delta_m$  karena perbedaan antara sudut bus kirim

dan terima semakin kecil sehingga nilai  $d = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m}$  akan lebih kecil dan

$e = 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{\text{load}} \right) V$  akan lebih besar. Nilai  $d$  yang kecil dan nilai  $e$  yang

besar menyebabkan jarak menuju  $d = e$  atau  $\frac{d\Delta Q}{dV} = 0$  lebih jauh. Inilah

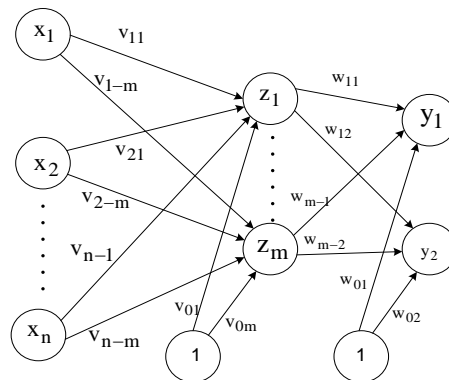
yang memungkinkan strategi tersebut mampu meningkatkan batas stabilitas sistem.

### 3.6.1. Algoritma *Neural Network*

Pelatihan jaringan algoritma *backpropagation* terdiri dari dua tahap, yaitu perambatan maju dan perambatan mundur.

Selama perambatan maju, setiap unit *input* ( $x_i$ ) menerima sinyal ini sebagai *input* ke setiap lapisan tersembunyi  $z_1, \dots, z_p$ . Setiap unit tersembunyi kemudian menghitung aktivasinya dan mengirimkan sinyalnya ( $z_j$ ) ke setiap unit *output*. Setiap unit *output* ( $y_k$ ) menghitung aktivasinya ( $y_k$ ) untuk membentuk respons dalam jaringan untuk menyediakan pola *input*. Selama pelatihan, setiap unit *output* membandingkan komputasi aktivasinya  $y_k$  dengan nilai targetnya  $t_k$  untuk menentukan kesalahan pola unit tersebut.

Faktor  $\delta_k$  ( $k = 1, \dots, m$ ) dihitung karena kesalahan tersebut. Dan untuk menyebarkan kesalahan pada unit keluaran  $y_k$  kembali ke semua unit di lapisan sebelumnya (unit tersembunyi yang terhubung ke  $y_k$ ),  $\delta_k$  digunakan. Di samping itu, juga digunakan (nanti) untuk memperbarui bobot antara *output* dan lapisan tersembunyi. Dengan cara yang sama, faktor ( $j = 1, \dots, p$ ) dihitung untuk setiap unit tersembunyi  $z_j$ . Alih-alih menyebarkan kesalahan kembali ke lapisan *input*,  $\delta_j$  digunakan untuk memperbarui bobot antara lapisan tersembunyi dan lapisan *input*.

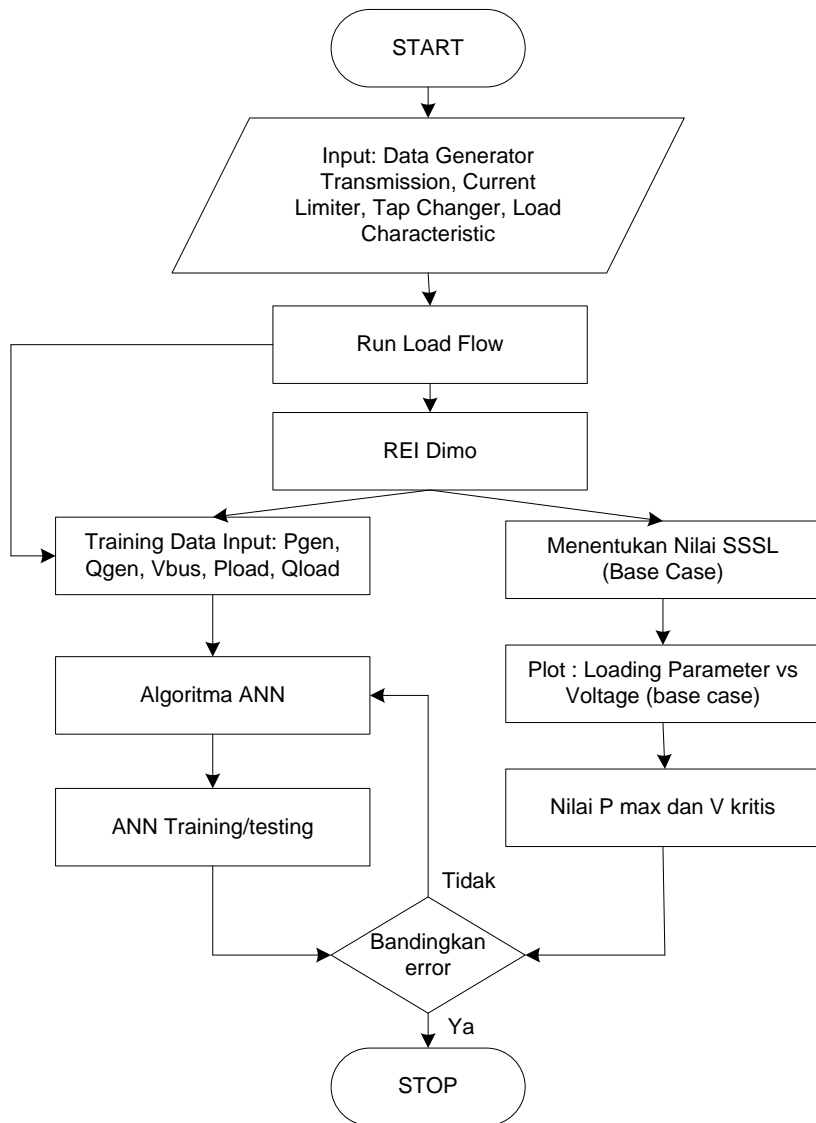


**Gambar 27** Arsitektur Jaringan *Backpropagation* ANN

Pada tinjauan ini, strategi *backpropagation neural network* digunakan untuk meminimalkan pengaruh nonlinier dari profil tegangan di pusat beban dari hasil *REI-Dimo Equivalent* pada nilai batas stabilitas *steady state* sistem tenaga.

Simulasi dimulai dengan melakukan tinjauan aliran data pada sistem Jawa-Bali. Kemudian sistem direduksi menjadi jaringan yang lebih sederhana, dengan menggunakan *REI-Dimo Equivalent*, yaitu dengan mengubah semua bus beban menjadi bus pusat beban (*load center*). Profil tegangan sistem dan parameter yang dihasilkan dari REI-Dimo digunakan sebagai informasi (data) *input* ANN.

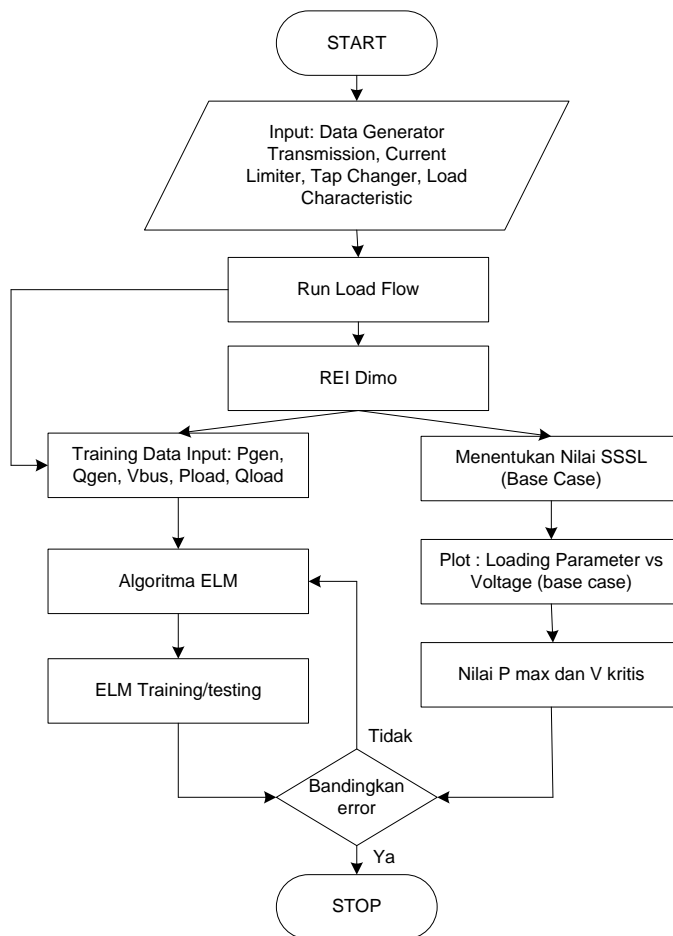
Ada dua neuron keluaran yang akan diestimasi, yaitu nilai indeks SSSL dan tegangan pusat beban. Sementara jumlah perolehan neuron tersembunyi yang digunakan berdasarkan nilai *trial and error*. Informasi masukan yang disajikan dalam *Steady State Stability Assessment using Nueral Network* (SSSAN) dipilih sebagai parameter yang memengaruhi sistem tenaga. Dengan demikian, perubahan daya pada beban, tegangan jaringan, daya aktif dan reaktif pembangkitan dalam kasus ini digunakan sebagai representasi parameter stabilitas sistem tenaga. Algoritma untuk tinjauan ini ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 28** Tata Pelaksanaan Peninjauan *Steady State Stability Limit* Menggunakan *Artificial Neural Network* (ANN)

### 3.7. Tata Pelaksanaan Peninjauan Penentuan Batas *Steady State Stability* Menggunakan Kombinasi REI-Dimo dan *Extreme Learning Machine* (ELM)

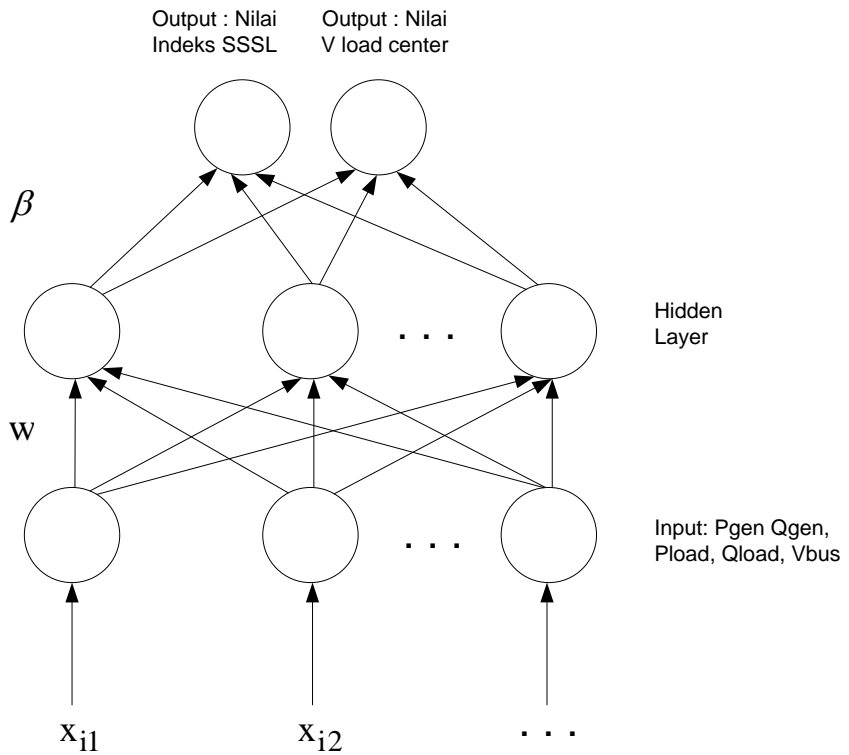
Telaah ini untuk menentukan batas stabilitas *steady state*. Dalam penelaahan ini, strategi ELM digunakan sebagai alat untuk memperkirakan nilai SSSL yang sudah dilatih dan diperiksa sebelumnya. Alur peninjauan untuk penelaahan ini ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 29** Tata Pelaksanaan Peninjauan *Steady State Stability Limit* Menggunakan *Extreme Learning Machine* (ELM)

### 3.7.1. Extreme Learning Machine

Informasi (data) sistem tenaga berupa daya pembangkit, daya beban, dan tegangan bus menjadi informasi masukan untuk ELM. Sementara nilai keluaran ELM adalah nilai indeks SSSL dan tegangan pusat beban ( $V_{load\ center}$ ). Gambar berikut menunjukkan struktur ELM.



**Gambar 30** Struktur ELM

Pada bagian akhir telaah ini, hasil estimasi ELM akan dibandingkan dengan hasil ANN.

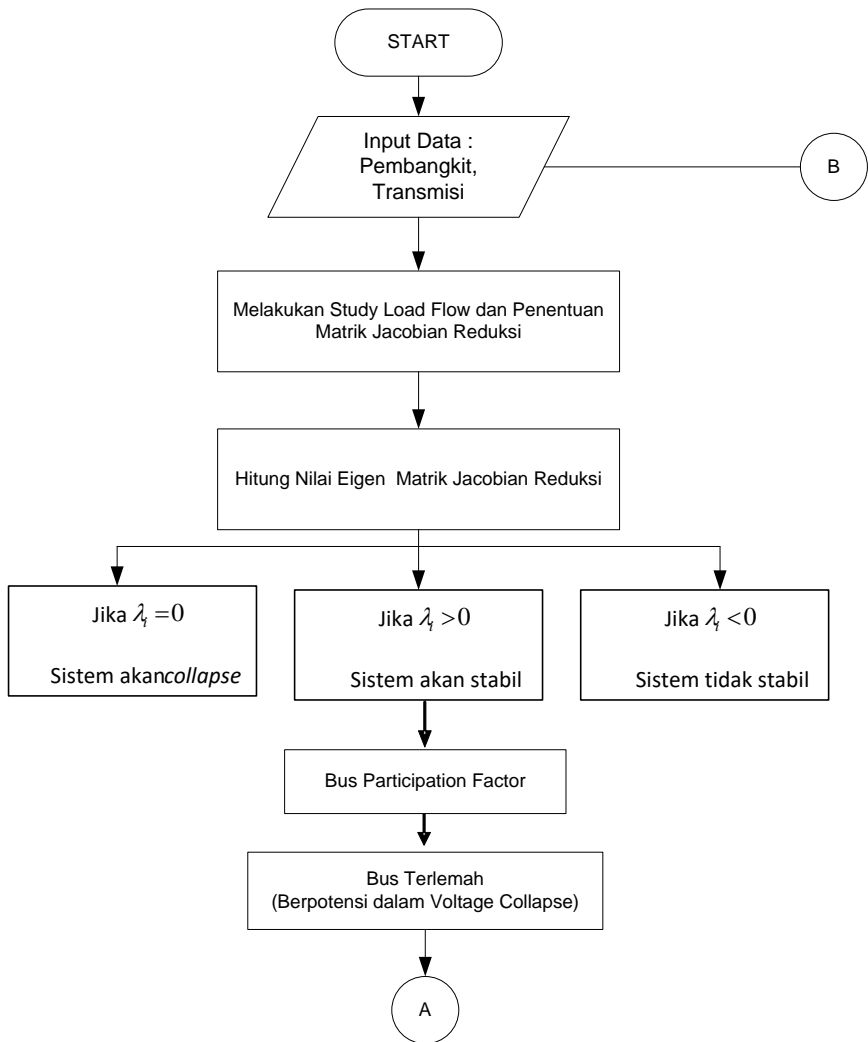
### 3.8. Tata Pelaksanaan Peninjauan *Steady State Stability* Menggunakan *Extereme Learning Machine* Berdasarkan *Strategi Modal Analysis*

Penelaahan ini dimulai dengan mengumpulkan informasi (data) generator, transmisi, dan operasi. Kemudian melakukan telaah aliran daya. Namun, pertama-tama harus menyusun informasi aliran daya secara berurutan, yaitu bus generator diberi nomor secara berurutan untuk mempermudah proses reduksi. Kemudian, nilai matriks Jacobian reduksi ( $J_R$ ) ditentukan dari matriks Jacobian *Load Flow* Newton Raphson. Setelah itu, nilai *eigen* ditentukan dari matriks  $J_R$ .

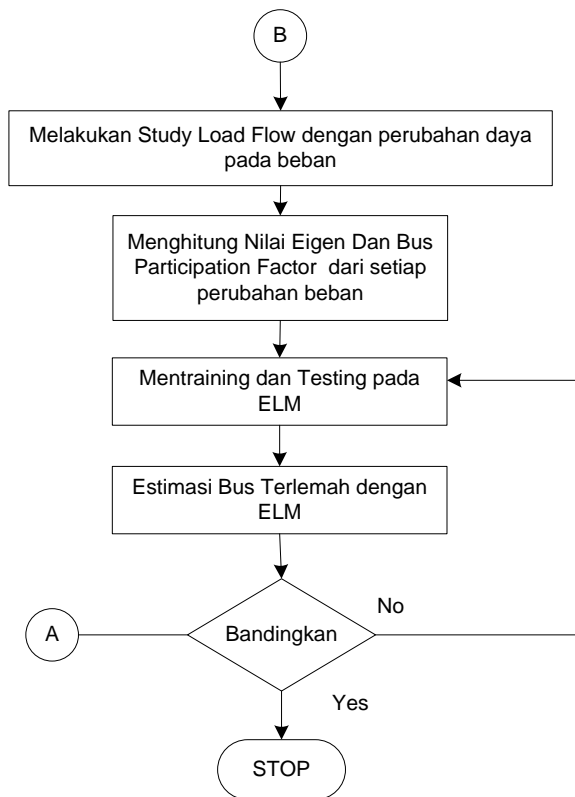
Berdasarkan *Modal Analysis* diperoleh nilai *eigen* terkecil pada beberapa bus. Nilai *eigen* tersebut merupakan nilai yang paling dekat dengan ketidakstabilan sehingga diperlukan penelaahan lebih lanjut untuk mendapatkan bus dengan probabilitas ketidakstabilan yang lebih tinggi. Untuk menentukan kondisi setiap bus atau *node* yang lemah, parameter yang disebut partisipasi faktor digunakan. Nilai *eigenvalues* yang kecil ditelaah dengan bus partisipasi faktor untuk memberi gambaran seberapa dekat bus menjadi tidak stabil. Bus dengan nilai partisipasi faktor terbesar adalah bus yang paling besar kontribusinya terhadap ketidakstabilan tegangan.

Jika  $\Phi_i$  dan  $\Gamma_i$  masing-masing adalah nilai vektor *eigen* kanan dan kiri dari matriks *Jacobian*, maka nilai partisipasi faktor dari bus ke-k untuk nilai *eigen* yang ke-i adalah sebagai berikut.

$$P_{ki} = \Phi_{ki} \Gamma_{ik} \quad (72)$$



**Gambar 31** Tata Pelaksanaan Peninjauan *Steady State Stability* Menggunakan *Extreme Learning Machine* Berdasarkan Strategi *Modal Analysis*



**Gambar 31** Lanjutan: Tata Pelaksanaan Peninjauan *Steady State Stability* Menggunakan *Extreme Learning Machine* Berdasarkan Strategi *Modal Analysis*

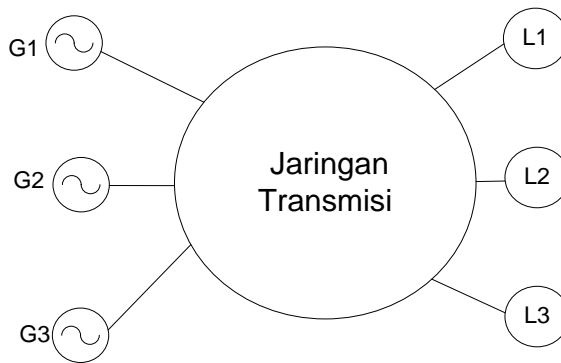
### 3.9. Tata Pelaksanaan Peninjauan *Active Power Rescheduling* untuk Meningkatkan Indeks Stabilitas *Steady State*

Diagram alir pada Gambar 32 menunjukkan tahap lengkap dari strategi yang sedang dikembangkan. Tahap pertama adalah membentuk matriks impedansi yang menghubungkan setiap pembangkit ke setiap titik beban. Tahap kedua yaitu menghitung kerugian per kW beban untuk setiap pasangan kombinasi titik beban dan generator. Dengan menggunakan matriks impedansi yang diperoleh pada tahap pertama, kerugian tersebut

dapat dengan mudah dihitung. Pada tahap ketiga, menghitung biaya pembangkitan berdasarkan nilai riil beban dan kerugian yang ditimbulkan. Perhitungan biaya pembangkitan ini dilakukan untuk setiap generator per kW beban. Hasil perhitungan ini akan dicantumkan dalam matriks biaya pembangkitan. Tahap terakhir yaitu mengembangkan algoritma pengiriman pembangkit berdasarkan matriks biaya pembangkitan yang diperoleh pada tahap ketiga, mengacu pada salah satu contoh kurva beban.

### 3.9.1. Membentuk Matriks Z Thevenin

Misalnya, suatu sistem tenaga terdiri dari 3 pembangkit dan 3 beban, maka ilustrasinya dapat dijelaskan sebagai berikut.



**Gambar 32** Sistem dengan Tiga Generator dan Tiga Beban

Persamaan arus dan tegangan yang dihasilkan adalah sebagai berikut.

$$[I] = [Y][V] \quad (73)$$

atau

$$[V] = [Z][I] \quad (74)$$

Urutan penomoran bus dimulai dengan bus generator, diikuti oleh bus beban. Kemudian diperoleh matriks tegangan sistem sebagai berikut.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Jika  $Z$  Thevenin antara Pembangkit G2 dan Beban L3 akan ditentukan, nilai  $I_1=I_3=I_4=I_5=0$ , karena pembangkit G1 dan G3 tidak memasok arus. Demikian juga dengan beban L1 dan L2.

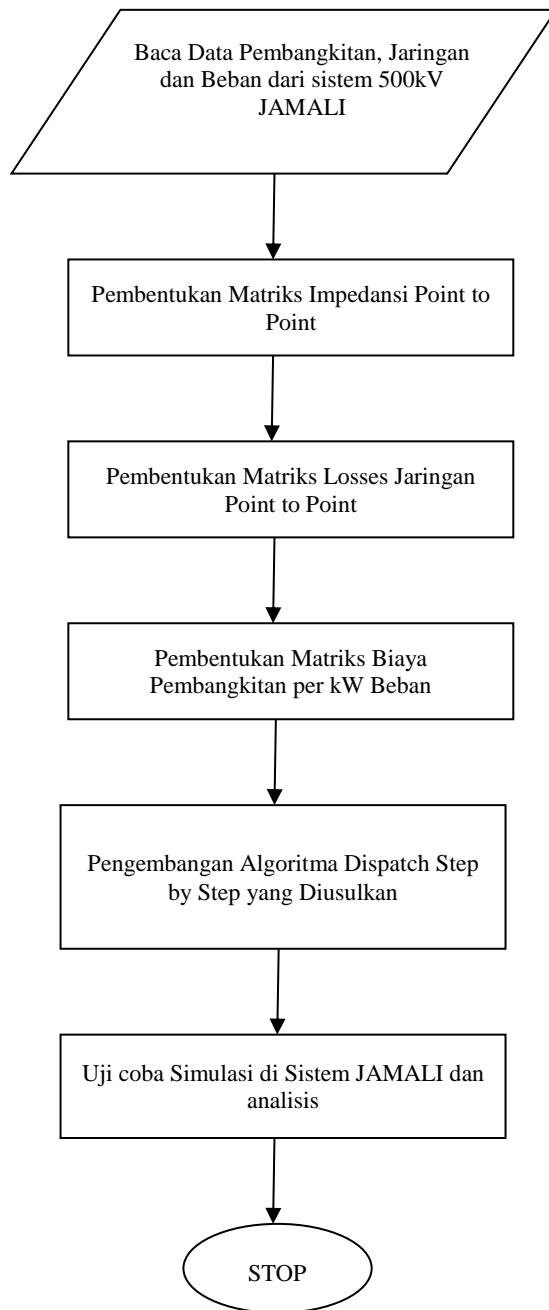
Persamaan tegangan menjadi:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} & Z_{15} & Z_{16} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} & Z_{25} & Z_{26} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} & Z_{35} & Z_{36} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} & Z_{45} & Z_{46} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} & Z_{54} & Z_{55} & Z_{56} \\ Z_{61} & Z_{62} & Z_{63} & Z_{64} & Z_{65} & Z_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

Atau:

$$[V_2] = [Z_{21}][0] + [Z_{22}][I_2] + [Z_{23}][0] + \dots + [Z_{26}][I_6] \quad (75)$$

$$[V_2] = [Z_{22}][I_2] + [Z_{26}][I_6] \quad (76)$$



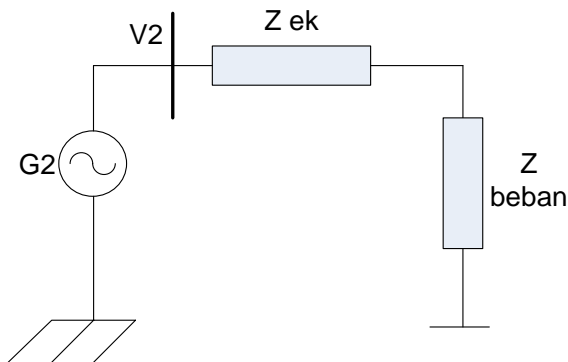
**Gambar 33** Tata Pelaksanaan Peninjauan *Active Power Rescheduling*

Besarnya arus  $[I_6] = [-I_2]$ , karena arus total yang mengalir dari generator sama dengan arus total yang mengalir ke beban, namun arahnya berbeda.

Kemudian diperoleh persamaan berikut.

$$[V_2] = ([Z_{22}] - [Z_{26}])[I_6] \quad (77)$$

Rangkaian Thevenin dari sumber pembangkit G2 ke beban L3 ditunjukkan pada gambar berikut.



**Gambar 34** Rangkaian Thevenin

$$[V_2] = ([Z_{ekv}] + [Z_{beban}])[I_2] \quad (78)$$

$$[Z_{22}] - [Z_{26}] = [Z_{ekv}] + [Z_{beban}] \quad (79)$$

Sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$[Z_{ekv}] = ([Z_{22}] - [Z_{26}]) - [Z_{beban}] \quad (80)$$

Menentukan matriks hubungan beban dan generator.

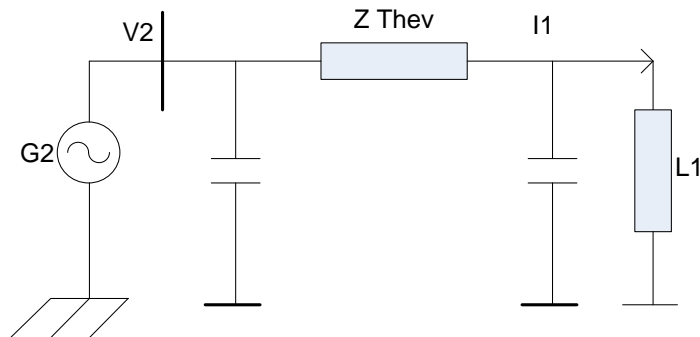
**Tabel 8** Hubungan Impedansi Generator dan Beban

Load\Gen	G <sub>1</sub>	G <sub>2</sub>	G <sub>3</sub>
L <sub>1</sub>	Z <sub>11</sub>	Z <sub>12</sub>	Z <sub>13</sub>
L <sub>2</sub>	Z <sub>21</sub>	Z <sub>22</sub>	Z <sub>23</sub>
L <sub>3</sub>	Z <sub>31</sub>	Z <sub>32</sub>	Z <sub>33</sub>

$Z_{11}=Z_{12}=Z_{13}=Z_{21}=Z_{22}=Z_{23}=Z_{31}=Z_{32}=Z_{33}$  merupakan impedansi Thevenin. Dari matriks ini, dapat ditentukan pola operasi beban ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ) di mana generator akan beroperasi secara optimal.

Misalnya, beban  $L_1$  masuk ke dalam sistem, maka generator yang akan beroperasi optimal adalah generator dengan nilai  $Z$  Thev terkecil (dari matriks di atas). Pilihan ini didasarkan pada asumsi bahwa nilai  $Z$  Thev yang paling kecil akan menghasilkan rugi-rugi transmisi yang paling kecil.

Misalnya, nilai  $Z$  Thev paling kecil adalah  $Z_{12}$ , maka saat beban  $L_1$  masuk, generator  $G_2$  adalah yang paling murah untuk dioperasikan.



**Gambar 35** Penentuan Impedansi Thevenin

$$Losses = I_1^2 R_{12} + P_{L1} = P_{G1} \quad (81)$$

Nilai *losses* dikalikan dengan harga bahan bakar (Rp/kW) per generator. Matriks beban per kW diperoleh untuk perubahan biaya generator.

**Tabel 9** Hubungan Biaya terhadap perubahan Beban

Load\Gen	$G_1$	$G_2$	$G_3$
$L_1$	(Rp/kW)beban <sub>1</sub>	(Rp/kW)beban <sub>1</sub>	(Rp/kW)beban <sub>1</sub>
$L_2$	(Rp/kW)beban <sub>2</sub>	(Rp/kW)beban <sub>2</sub>	(Rp/kW)beban <sub>2</sub>
$L_3$	(Rp/kW)beban <sub>3</sub>	(Rp/kW)beban <sub>3</sub>	(Rp/kW)beban <sub>3</sub>

Generator dengan nilai terkecil (Rp/kW) berarti generator tersebut paling termurah dan diprioritaskan untuk dioperasikan lebih dulu. Untuk pola operasi di mana beban masuk ke sistem pada saat yang sama, urutan generator perlu diurutkan berdasarkan nilai paling kecil.

# BAB IV

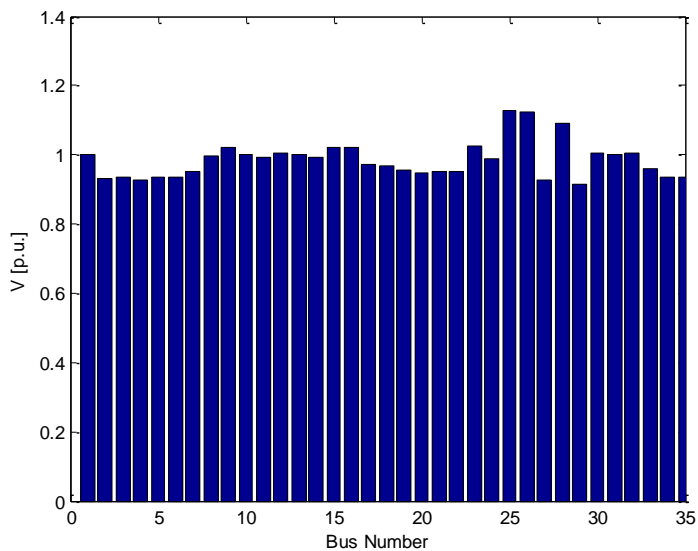
## PENGARUH KARAKTERISTIK BEBAN TERHADAP BATAS STABILITAS *STEADY STATE*

Dalam tinjauan ini, sistem yang digunakan sebagai *test case* adalah sistem interkoneksi Sulseltrabar. Langkah pertama dalam tinjauan ini adalah melakukan telaah *load flow*. Kemudian sistem Sulseltrabar direduksi menjadi bentuk REI-Dimo dengan memasukkan informasi (data) *tap changer*, *current limiter*, dan karakteristik beban sistem.

**Tabel 10** Perolehan *Load Flow* Sistem Sulseltrabar

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 1	1	0	1.833	-0.53732	0.03	0.002
Bus 10	0.93	-0.45513	0.72	-0.75493	0.058	0.018
Bus 11	0.93519	-0.46215	0	0	0.286	-0.039
Bus 12	0.92883	-0.45962	0	0	0.457	0
Bus 13	0.9352	-0.45963	0	0	0.17	0.026
Bus 14	0.93363	-0.46216	0	0	0.112	0.051
Bus 15	0.95234	-0.46059	0	0	0.108	0.042
Bus 16	0.99821	-0.19158	0	0	0.119	0.08
Bus 17	1.02	-0.18675	0.04	0.38638	0	0
Bus 18	1	-0.18085	0.112	-0.28836	0.106	0
Bus 19	0.99385	-0.25872	0	0	0.1	0.061
Bus 2	1.0061	-0.08074	0	0	0.09	0.04
Bus 20	1	-0.2521	0.2389	0.13899	0.122	0.065
Bus 21	0.99081	-0.31385	0	0	0.201	0.069
Bus 22	1.023	-0.43645	0.005	0.20067	0.152	0.014
Bus 23	1.023	-0.45954	0.007	0.65401	0.099	0.03
Bus 24	0.97208	-0.5054	0	0	0	0
Bus 25	0.96897	-0.5062	0	0	0.06131	0.06706
Bus 26	0.95447	-0.5377	0	0	0.1385	0.00744
Bus 27	0.94772	-0.55555	0	0	0.12555	0
Bus 28	0.95058	-0.55128	0	0	0.14382	0.02213
Bus 29	0.95	-0.53761	0.093	-0.75252	0	0
Bus 3	1.027	-0.09304	0.018	0.25935	0.084	0.017
Bus 30	0.99	-0.56366	0.039	0.36849	0.058	0

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 31	1.126	-0.48704	0	0	0	0
Bus 32	1.1251	-0.48853	0	0	0.05052	0
Bus 33	0.92673	-0.5107	0	0	0	0
Bus 34	1.09	-0.55509	0.093	0.33145	0.1207	0.05496
Bus 35	0.91511	-0.52834	0	0	0.08544	0
Bus 4	1.007	-0.11974	0.007	0.34664	0.099	0.038
Bus 5	1	-0.16474	0	0	0.095	0.04
Bus 6	1.007	-0.15729	0.622	0.327	0	0
Bus 7	0.96192	-0.2726	0	0	0.042	0.017
Bus 8	0.93617	-0.38921	0	0	0.12	0.06
Bus 9	0.93457	-0.39565	0	0	0.1432	0

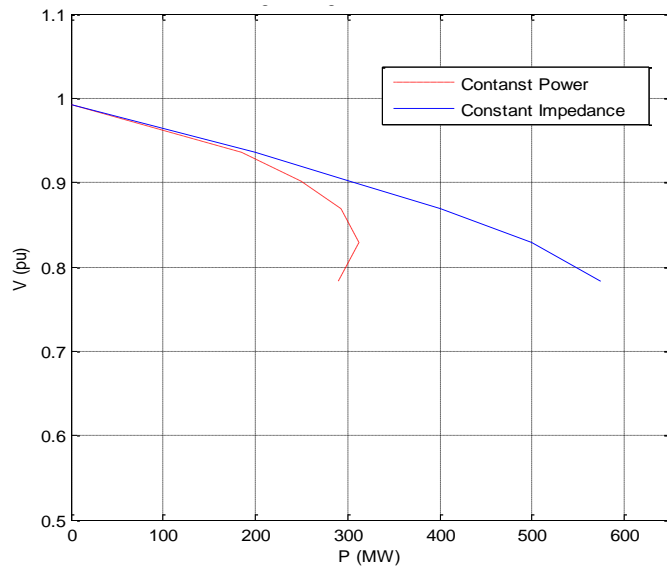


**Gambar 36** Profil Tegangan pada Sistem Sulseltrabar

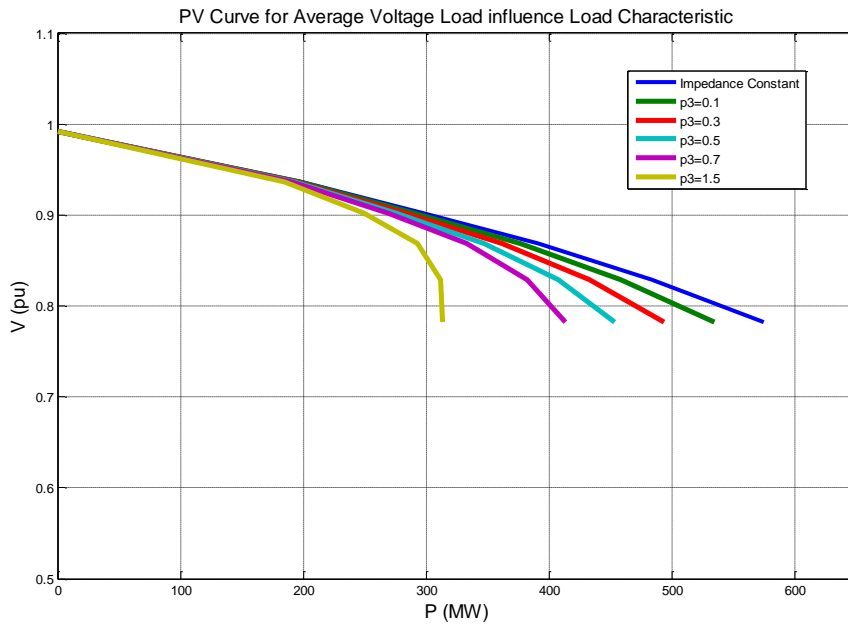
Setelah proses eliminasi Gaussian, sistem Sulsetrabar menjadi 14 bus pembangkit dan 1 bus pusat beban. Kemudian nilai SSSL diperoleh untuk model beban dengan karakteristik impedansi konstan. Gambar 37 menunjukkan hubungan antara daya aktif sistem dan tegangan. Terlihat bahwa pembatasan SSSL pada sistem Sulseltrabar menghasilkan nilai SSSL sebesar 574 MW pada kondisi beban dengan karakteristik beban impedansi konstan, sedangkan untuk beban dengan karakteristik daya konstan diperoleh nilai SSSL sebesar 320 MW. Ini menunjukkan bahwa

karakteristik beban sangat berpengaruh terhadap batas SSSL dan berperan besar dalam fenomena *black out* akibat *voltage collapse*.

Konsumen listrik terbesar di sistem Sulawesi Selatan terutama adalah beban perumahan (*residential loads*). Terdapat empat beban industri utama, yaitu Semen Tonasa (40 MW), Bosowa Semen (30 MW), Indofood (10 MW), dan Barawaja Steel (5 MW). Parameter model beban ditentukan dengan koefisien  $\rho_1$  hingga  $\rho_3$  adalah 0,85, 0,05, dan 0,1.



**Gambar 37** Hubungan antara Daya Aktif dan Tegangan untuk Karakteristik Beban yang Berbeda pada Sistem Sulseltrabar



**Gambar 38** Hubungan antara Daya Aktif dan Tegangan untuk Nilai Konstanta  $p_1$  dan  $p_3$  yang Berubah

**Tabel 11** Pengaruh Konstanta  $p_1$  dan  $p_3$  terhadap Penurunan Batas Kestabilan

No	P Constant	P maks	Penurunan Margin Stability (%)
1	0.1	583.69	2.72
2	0.3	552.4	7.93
3	0.5	522.78	12.87
4	0.7	494.75	17.54
5	0.9	468.22	21.96
6	1.1	443.12	26.15
7	1.3	419.36	30.11
8	1.7	375.6	37.40
9	2	345.8	42.37

# BAB V

## PENGARUH *TAP CHANGER*, *LOAD CHARACTERISTIC*, DAN *CURRENT LIMITER* TERHADAP STABILITAS *STEADY STATE*

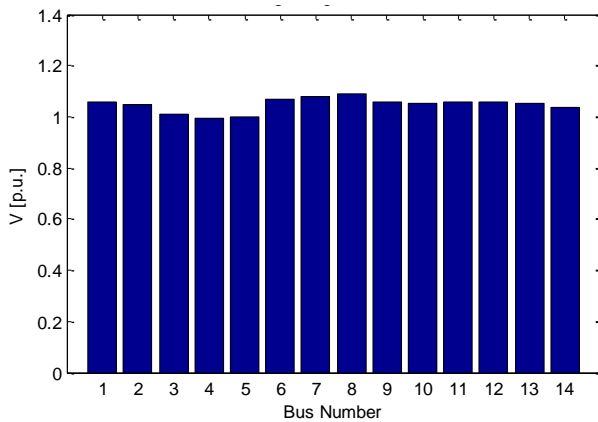
Sistem yang digunakan sebagai *test case* adalah sistem IEEE 14 bus. Tujuan dari tinjauan ini adalah untuk melihat pengaruh *tap changer*, *load characteristic*, dan *current limiter* pada batas kestabilan *steady state* dengan menggunakan perangkat lunak PSAT versi 1.3.4.

Tinjauan ini diawali dengan melakukan telaah aliran daya dengan menggunakan strategi Newton Raphson. Hasil *load flow* untuk sistem IEEE 14 bus ditunjukkan pada tabel berikut.

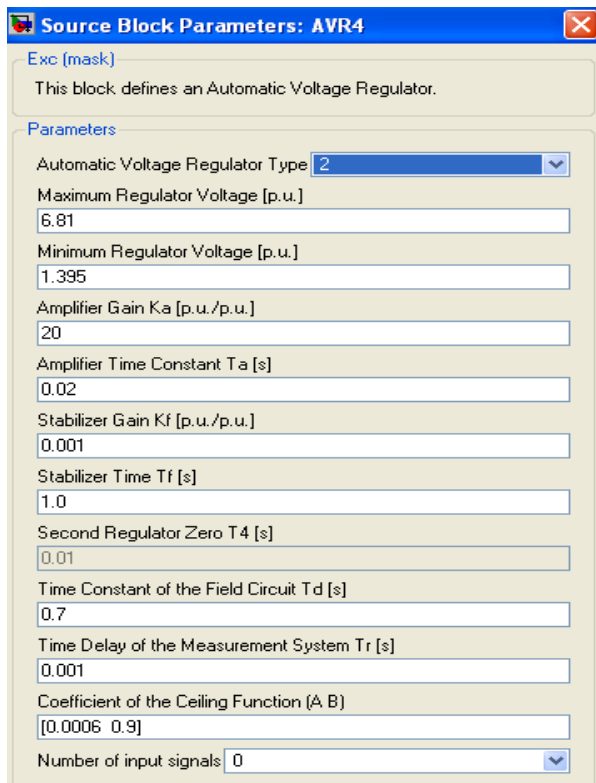
**Tabel 12** Perolehan *Load Flow* Sistem IEEE 14 Bus

Bus no.	V [p.u.]	Phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus 01	1.06	0	2.3296	-0.08013	0	0
Bus 02	1.045	-0.08789	0.4	0.69107	0.217	0.127
Bus 03	1.01	-0.22574	0	0.38466	0.942	0.19
Bus 04	0.99345	-0.17549	0	0	0.478	0.04
Bus 05	1.0005	-0.14926	0	0	0.076	0.016
Bus 06	1.07	-0.24119	0	0.03904	0.112	0.075
Bus 07	1.0789	-0.22568	0	0	0	0
Bus 08	1.09	-0.22568	0	0.06877	0	0
Bus 09	1.06	-0.25317	0	0	0.295	0.166
Bus 10	1.0543	-0.25605	0	0	0.09	0.058
Bus 11	1.0586	-0.25095	0	0	0.035	0.018
Bus 12	1.0555	-0.25601	0	0	0.061	0.016
Bus 13	1.051	-0.25744	0	0	0.135	0.058
Bus 14	1.0381	-0.27241	0	0	0.149	0.05

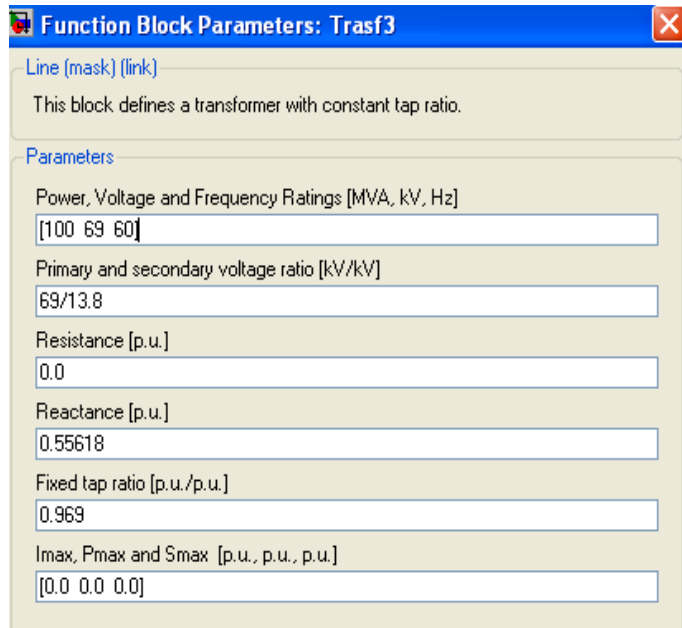
Selanjutnya melakukan telaah *Continuation Power Flow* (CPF) untuk melihat bus yang kurang stabil atau bus lemah (*weak bus*). Model AVR dan *Tap Changer* yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 40-41.



**Gambar 39** Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus



**Gambar 40** Function Block AVR pada Software PSAT



**Gambar 41** *Function Block Tap Changer* pada Software PSAT

### **Kasus I: Kondisi Normal**

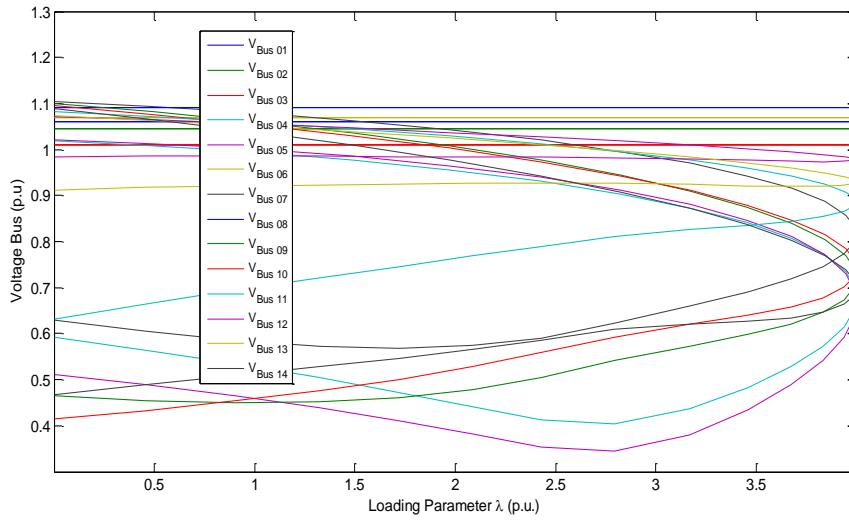
Dalam kondisi pengoperasian normal, *tap changer* diatur pada posisi berikut.

Rasio *Tap Changer Line 5-6*: 0,932

Rasio *Tap Changer Line 4-9*: 0,969

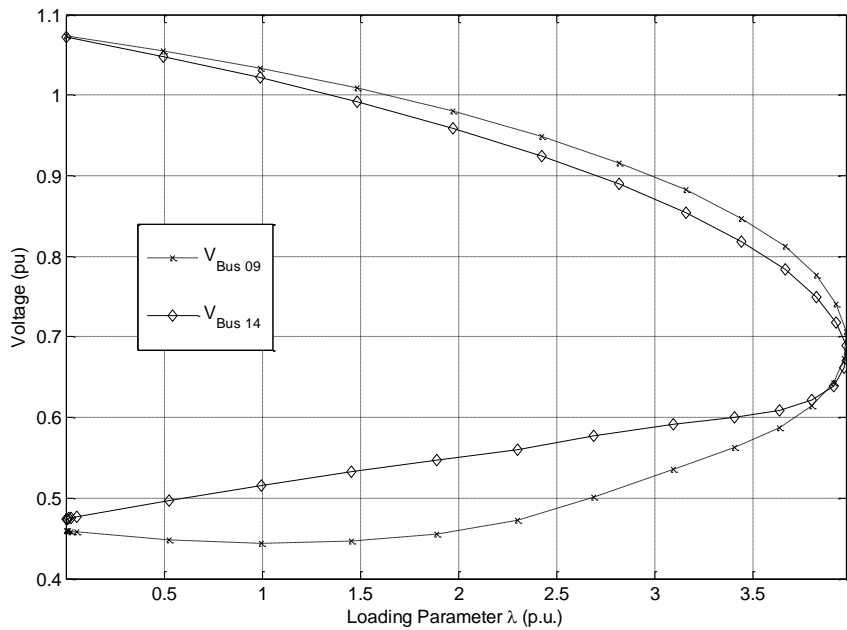
Rasio *Tap Changer Line 4-9*: 0,978

Dengan menggunakan informasi (data) tersebut, kemudian dilakukan telaah *Continuation Power Flow* (CPF), hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 42.



**Gambar 42** Hubungan *Loading* Parameter terhadap Tegangan Bus

Seperti terlihat pada Gambar 42, bus terlemah adalah bus nomor 14, disusul bus nomor 9. Peralnya, kecuraman grafik kedua bus tersebut memiliki kemiringan yang paling terjal. Keadaan ini menunjukkan bahwa perubahan beban menyebabkan perubahan tegangan yang relatif besar dibandingkan dengan bus lainnya.



**Gambar 43** Hubungan *Loading Parameter* vs Tegangan Bus 14 dan Bus 9

Gambar tersebut menunjukkan bahwa pada saat posisi *tap changer* dalam kondisi operasi normal, nilai tegangan kritis pada bus 14 sebesar 0,45952 (p.u) dan beban maksimum sebesar 3,97295 (p.u).

**Kasus II: Tap Changer berubah pada posisi 0,9**

Dikondisikan bahwa *tap changer* menurun dengan besar perubahan sebagai berikut.

Rasio *Tap Changer Line 5-6*: 0,9

Rasio *Tap Changer Line 4-9*: 0,9

Rasio *Tap Changer Line 4-9*: 0,9

Dengan langkah simulasi yang sama, bus 14 tetap menjadi bus terlemah dengan nilai tegangan kritis 0,46816 (p.u) dan beban maksimum 3,9949 (p.u).

**Kasus III: Tap Changer berubah pada posisi 1.0**

Dikondisikan bahwa *tap changer* meningkat dengan besar perubahan sebagai berikut.

Rasio *Tap Changer Line* 5-6: 1,0

Rasio *Tap Changer Line* 4-9: 1,0

Rasio *Tap Changer Line* 4-9: 1,0

Ditemukan bahwa bus terlemah masih bus 14 dengan nilai tegangan kritis 0,46836 (p.u) dan beban maksimum 3,95606 (p.u).

**Kasus IV: Tap Changer berubah pada posisi 1,1**

Dikondisikan bahwa *tap changer* meningkat dengan besar perubahan sebagai berikut.

Rasio *Tap Changer Line* 5-6: 1,1

Rasio *Tap Changer Line* 4-9: 1,1

Rasio *Tap Changer Line* 4-9: 1,1

Ditemukan bahwa bus terlemah masih bus 14 dengan nilai tegangan kritis 0,47238 (p.u) dan beban maksimum 3,89324 (p.u).

**Tabel 13** Perbandingan Hubungan Perubahan *Tap Changer* dengan Pembebanan Maksimum dan Tegangan Kritis

Nilai	Posisi <i>Tap Changer</i>			
	Normal	tap = 0.9	tap = 1	tap = 1.1
V Load Kritis (p.u)	0.45952	0.46816	0.46836	0.47238
P Max (p.u)	3.97295	3.9949	3.95606	3.89324

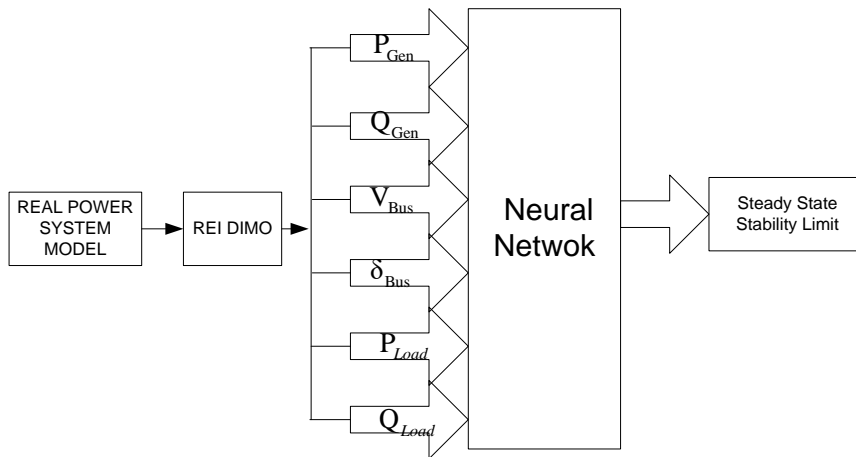
Tabel 13 menunjukkan bahwa posisi *tap changer* berpengaruh terhadap nilai tegangan beban ( $V_{Load\ Kritis}$ ) dan nilai daya maksimum ( $P_{max}$ ). Semakin besar nilai *tap ratio*, semakin tinggi tegangan kritis dan semakin kecil nilai daya maksimum.

# BAB VI

## **BATAS STABILITAS *STEADY STATE* MENGGUNAKAN *ARTIFICIAL NEURAL NETWORK* (ANN) UNTUK SISTEM JAWA-BALI**

Sistem yang digunakan sebagai *test case* adalah sistem Jawa-Bali 500 kV. Gambar 44 menunjukkan skema tinjauan yang diusulkan. Langkah-langkah tinjauan ini adalah sebagai berikut.

1. Mereduksi sistem Jawa Bali menjadi model sistem tenaga listrik yang lebih sederhana menggunakan REI-Dimo.
2. Menentukan indeks batas stabilitas *steady state* menggunakan REI-Dimo.
3. Mengubah daya pusat beban untuk memperoleh parameter sistem, seperti daya aktif dan reaktif generator, besar dan sudut tegangan bus, Nilai  $D$  dan  $E$  dari model REI-Dimo, dan indeks SSSL.
4. Seluruh informasi (data) yang diperoleh pada langkah 3 akan digunakan sebagai informasi pelatihan, validasi, dan pemeriksaan.
5. Menentukan indeks SSSL dengan menggunakan ANN.

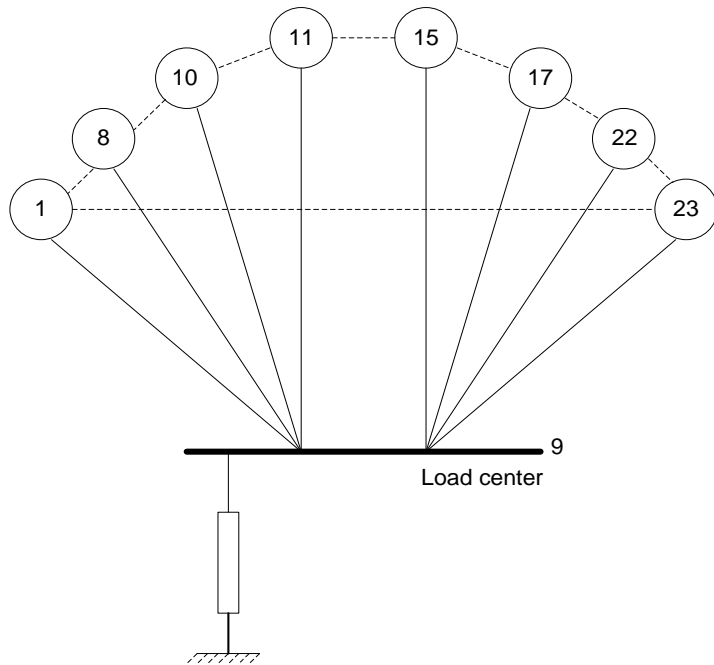


**Gambar 44** Skema Peninjauan SSSL Menggunakan ANN

### 6.1. *REI-Dimo Equivalent* untuk Sistem Jawa-Bali 500 kV

Sebelum membuat model *REI-Dimo Equivalent*, terlebih dahulu dilakukan telaah aliran daya menggunakan strategi Newton Raphson. Dari penelaahan ini didapatkan nilai tegangan dan sudut masing-masing bus. Selanjutnya dilakukan proses *REI-Dimo Equivalent*, di mana jumlah bus sistem Jawa-Bali akan dikurangi dari 23 bus menjadi 9 bus, yaitu 8 bus pembangkit dan 1 bus beban.

Gambar 45 menunjukkan bentuk *REI-Dimo Equivalent* untuk sistem Jawa-Bali dengan 8 bus generator dan 1 bus pusat beban. Nilai  $Y$  bus setelah eliminasi Gaussian dan parameter REI-Dimo ditunjukkan pada Tabel 14 dan Tabel 15.



**Gambar 45** Sistem Jawa-Bali 500 kV Setelah Direduksi

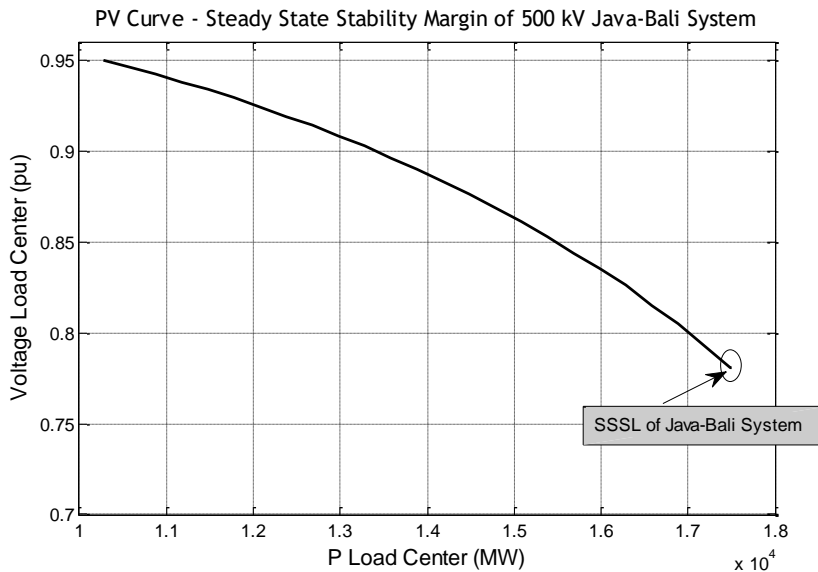
**Tabel 14** Nilai Admitansi Bus REI-Dimo untuk Sistem Jawa-Bali 500 kV

<i>No Gen Bus</i>	<i>Bus 9 (Load Center)</i>
1	-0.2296 - 2.7875i
8	-0.2282 - 2.5303i
10	-0.1732 - 1.8221i
11	0.0657 - 3.0665i
15	0.1065 - 0.6660i
17	0.0144 - 1.6252i
22	-0.0420 - 2.1648i
23	0.1672 - 0.6704i
9	0.3178 +15.2987i

**Tabel 15** Parameter REI-Dimo

No Bus	Y re G (pu)	Y im B (pu)	REI MW	REI MVAR	V (pu)	V ang(°)
1	-0.2296	-0.7875	3314.2	988.564	1.02	0
8	-0.2282	-0.5303	1470	679.361	1	-6.241
10	-0.1732	-0.8221	400	484.322	1	-7.029
11	0.0657	-0.0665	535	1043.09	1	-6.663
15	0.1065	-0.666	830	361.87	1	9.938
17	0.0144	-0.6252	810	608.616	1	9.735
22	-0.042	-0.1648	2820	895.043	1	14.303
23	0.1672	-0.6704	198	395.97	1	11.751
9	-0.637	-0.0341	10264	4032	0.94	-4.267

Sistem Jawa-Bali diubah menjadi model reduksi dengan menggunakan strategi REI-Dimo. Kemudian dengan menggunakan persamaan (64), diperoleh batas kestabilan sistem Jawa-Bali. Nilai *Steady State Stability Limit* (SSSL) pada sistem Jawa-Bali menggunakan REI-Dimo ditunjukkan pada Gambar 46.



**Gambar 46** *Steady State Stability Limit* (SSSL) untuk Sistem Jawa-Bali

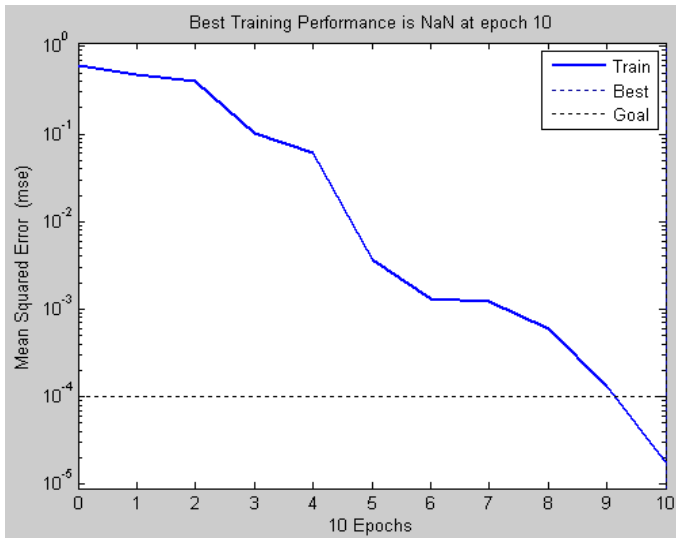
Seluruh informasi (data) yang diperoleh dari REI-Dimo seperti besar pembangkitan daya aktif ( $P_{Gen}$ ), pembangkitan daya reaktif ( $Q_{Gen}$ ), tegangan di seluruh bus, daya aktif dan daya reaktif pada beban digunakan sebagai informasi masukan, sementara tegangan pusat beban ( $V_{load\ center}$ ) dan nilai indeks SSSL *REI-Dimo Equivalent* digunakan sebagai informasi keluaran untuk ANN. Seluruh informasi dilatih menggunakan strategi *backpropagation* dengan 5 lapisan neuron dan 2 keluaran.

Beberapa informasi yang diperoleh dari REI-Dimo dapat dilihat pada Tabel 16. Adapun keseluruhan informasi yang digunakan dapat dilihat pada Lampiran I.

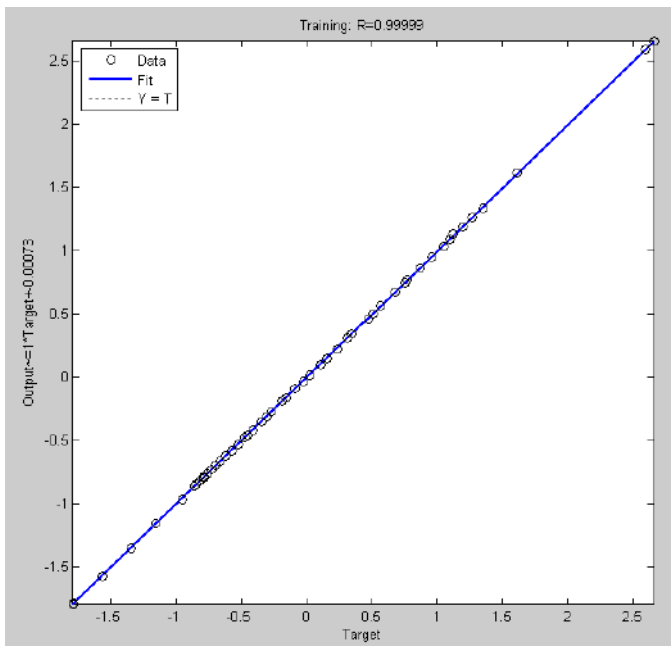
**Tabel 16** Beberapa Informasi yang Diperoleh dari REI-Dimo

$P_1$	$Q_1$	$V_1$	$\Theta_1$	...	$P_{Load}$	$Q_{Load}$	$V_{Load}$	$\Theta_{Load}$	D	E	SSSL Index
1657.62	898.594	1.02	0	...	10282	4032	0.95	-26.7	61.07	120.7	-59.657
1905.77	969.249	1.02	0	...	10582	4148.14	0.946	-28.88	61.26	120.6	-59.294
2149.54	1046	1.02	0	...	10882	4265.74	0.942	-31.08	61.46	120.4	-58.895
2388.82	1128.7	1.02	0	...	11182	4383.34	0.938	-33.3	61.69	120.1	-58.458
2623.35	1217.23	1.02	0	...	11482	4500.94	0.934	-35.53	61.94	119.9	-57.98
2852.83	1311.47	1.02	0	...	11782	4618.54	0.929	-37.78	62.22	119.7	-57.456
3076.92	1411.29	1.02	0	...	12082	4736.14	0.924	-40.05	62.53	119.4	-56.883

Dengan menggunakan REI-Dimo, diperoleh tegangan maksimum pada area pusat beban ( $V_{load(max)}$ ) sebesar 0,781 (pu) dan nilai SSSL sebesar -1.2376. Kemudian, seluruh informasi yang diperoleh dari REI-Dimo dilatih pada ANN. Hasil ANN menunjukkan bahwa tegangan pada pusat beban ( $V_{load(max)}$ ) sebesar 0,7807 (pu) dan nilai SSSL sebesar 1,3111.



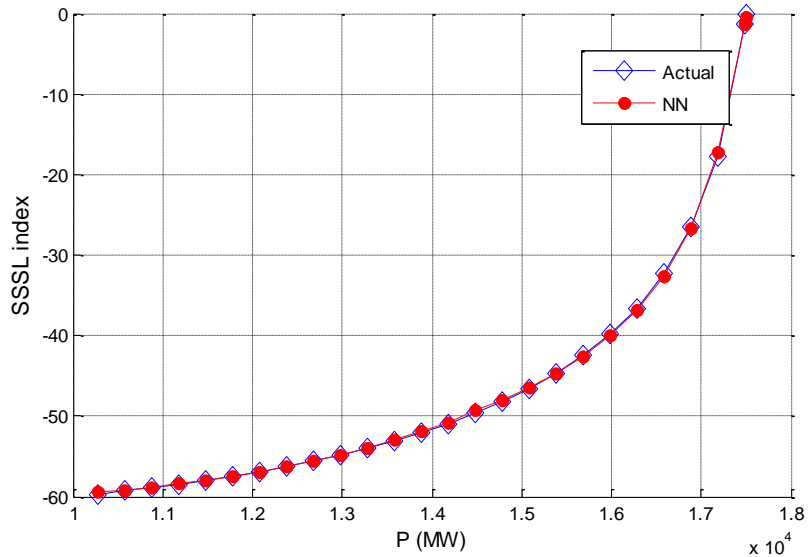
**Gambar 47** *Training Performance*



**Gambar 48** *Regression Plot*

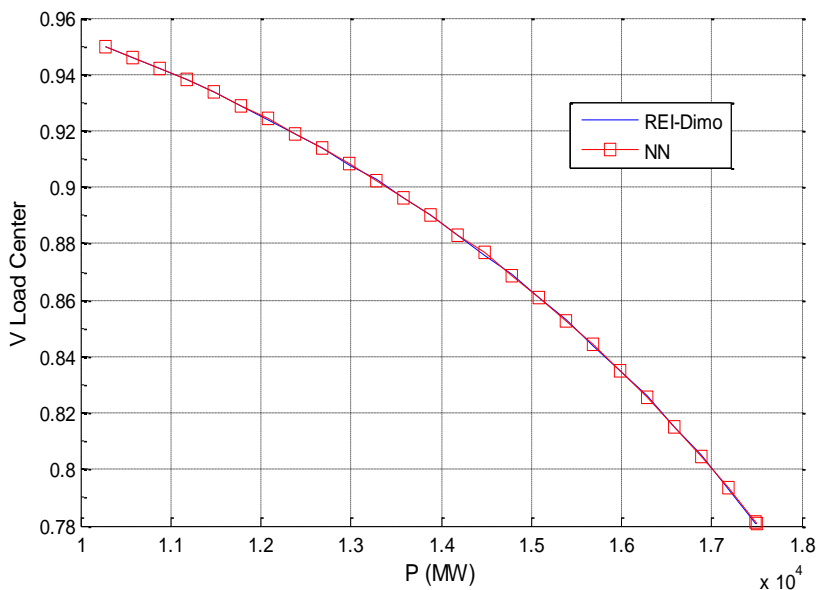
Gambar 47 dan 48 mengilustrasikan keefektifan strategi ANN untuk telaah batas stabilitas *steady state*. Seperti yang dapat dilihat pada Tabel 17, hasil keluaran *steady state stability* menggunakan ANN dibandingkan dengan nilai aktual REI-Dimo, nilai eror tegangan pusat beban ( $V_{load(max)}$ ) sebesar 0,00038 dan nilai SSSL sebesar 0,05. Ini menunjukkan bahwa hasil ANN untuk menentukan SSSL dapat diterima.

Gambar 49 dan 50 menunjukkan hasil ANN dibandingkan dengan nilai aktual yang diperoleh dari strategi REI-Dimo.



**Gambar 49** Perbandingan Nilai Daya Aktif pada Pusat Beban P (MW) terhadap Indeks SSSL antara REI-Dimo dan ANN

Setelah proses pelatihan dan pemeriksaan, kemudian ANN digunakan untuk menentukan SSSL, seperti yang terlihat pada Tabel 16. Dalam kondisi ini terlihat bahwa dengan mengetahui nilai pengukuran parameter sistem berupa besar tegangan bus dan sudut tegangan, selanjutnya digunakan sebagai informasi (data) masukan untuk memperkirakan nilai SSSL dengan menggunakan ANN.



**Gambar 50** Perbandingan Nilai Daya Aktif pada Pusat Beban P (MW) terhadap Tegangan pada Pusat Beban antara REI-Dimo dan ANN

**Tabel 17** Perbandingan Hasil dari REI-Dimo dengan ANN

No	Output	REI-Dimo	ANN Method	Error
1.	$V_{Load(max)}$	0.781	0.7807	0.00038
2.	SSSL	-1.2376	-1.2265	0.00897

Sebagai contoh diambil nilai operasi pada pusat beban dengan nilai daya aktif 10640 MW dan 4100,31 MVAR, nilai *steady state stability limit* -59,4459. Kemudian beban diubah dengan peningkatan nilai 250 MW dan 98 MVAR, masing-masing perubahan ini mengubah nilai SSSL.

Tabel 20–21 menunjukkan nilai eror yang dihasilkan dengan mengubah daya pusat beban dari 10460 MW menjadi 11460 MW dan 4100,32 MVAR menjadi 4492,32 MVAR serta tegangan pusat beban dari 0,948 (pu) menjadi 0,934 (pu). Nilai eror yang diperoleh kurang dari 0,5%.

Ini menunjukkan bahwa strategi yang diusulkan sangat cocok untuk telaah batas stabilitas *steady state*.

**Tabel 18** Beberapa Informasi Pemeriksaan

P Load Center (MW)	Q Load Center (MVAR)	V Load Center (pu)	Θ Load Center (degree)	D	E	SSSL Index
10460	4100.32	0.948	-27.993	61.1773	120.6233	-59.4459
10710	4198.32	0.945	-29.819	61.342	120.47	-59.128
10960	4296.32	0.941	-31.656	61.521	120.31	-58.785
11210	4394.32	0.938	-33.504	61.714	120.13	-58.415
11460	4492.32	0.934	-35.365	61.924	119.94	-58.016

**Tabel 19** Perbandingan Informasi Pemeriksaan terhadap Target untuk Index SSSL

No. Data	Data Pemeriksaan	Data Target	Error
1	-59.1794	-59.4459	0.0045
2	-58.9366	-59.1280	0.0032
3	-58.6467	-58.7850	0.0024
4	-58.3024	-58.4150	0.0019
5	-58.3482	-58.0160	0.0057

**Tabel 20** Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Target untuk Voltage Load Center

No. Data	Data Pemeriksaan	Data Target	Error
1	0.9457	0.9480	0.0024
2	0.9428	0.9450	0.0023
3	0.9398	0.9410	0.0013
4	0.9366	0.9380	0.0015
5	0.9364	0.9340	0.0025

Tabel 21 menunjukkan perbandingan nilai yang diperoleh dari REI-Dimo dan hasil estimasi ANN untuk telaah batas stabilitas *steady state* sistem Jawa-Bali 500 kV.

**Tabel 21** Perbandingan Hasil REI-Dimo dan Hasil Estimasi ANN

SSSL REI-DIMO	Vload REI-DIMO	SSSL NN	Vload NN	Error SSSL	Error Vload
-59.657	0.95	-59.2225	0.9462	-0.007336739	-0.004016064
-59.294	0.946	-58.9552	0.9432	-0.005746737	-0.002968617
-58.8953	0.942	-58.6394	0.9398	-0.00436396	-0.002340924
-58.4581	0.938	-57.9709	0.9338	-0.008404217	-0.004497751
-57.9795	0.934	-57.8291	0.932	-0.002600767	-0.002145923
-57.456	0.929	-57.3286	0.9276	-0.002222276	-0.001509271
-56.8833	0.924	-56.7611	0.9228	-0.002152883	-0.00130039
-56.2564	0.919	-56.128	0.9177	-0.002287628	-0.001416585
-55.5696	0.914	-55.4267	0.9123	-0.00257818	-0.001863422
-54.816	0.908	-54.6604	0.9066	-0.002846668	-0.001544231
-53.986	0.903	-53.8247	0.9007	-0.002996765	-0.002553569
-53.07	0.896	-52.9102	0.8946	-0.003020212	-0.001564945
-52.056	0.89	-51.9098	0.8883	-0.002816424	-0.001913768
-50.925	0.883	-50.8128	0.8818	-0.002208105	-0.001360853
-49.658	0.876	-49.5954	0.8753	-0.001262214	-0.000799726
-48.227	0.869	-48.1864	0.8679	-0.000842561	-0.001267427
-46.594	0.861	-46.5607	0.8603	-0.000715195	-0.00081367
-44.707	0.853	-44.6536	0.8522	-0.001195872	-0.000938747
-42.494	0.844	-42.3927	0.8434	-0.002389562	-0.000711406
-39.84	0.835	-39.6966	0.8341	-0.0036124	-0.001079007
-36.566	0.826	-36.448	0.8243	-0.003237489	-0.002062356
-32.354	0.815	-32.3744	0.8145	0.000630128	-0.000613874
-26.578	0.805	-26.7659	0.8045	0.007020126	-0.000621504
-17.766	0.793	-17.7213	0.7939	-0.002522388	0.001133644
-1.2376	0.781	-1.3111	0.7807	0.056059797	-0.000384271
-0.14974	0.781	-0.1439	0.7782	-0.040583739	-0.003598047

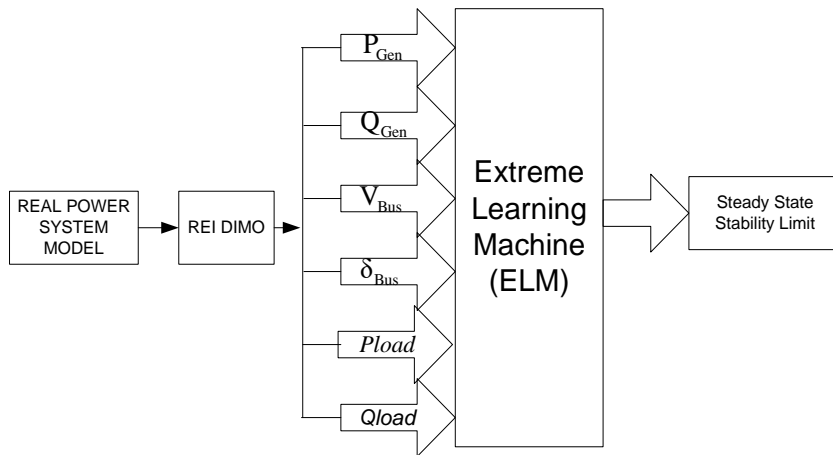
Hasil estimasi yang diperoleh dengan strategi ANN menunjukkan bahwa dari tingkat akurasi, strategi ini dapat digunakan untuk menentukan SSSL. ANN mempunyai beberapa keunggulan, yaitu bersifat adaptif, tingkat komputasi yang tinggi, pemrosesan terdistribusi paralel, dan toleran terhadap kesalahan, sehingga ANN dapat digunakan sebagai alternatif untuk aplikasi *real time monitoring*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbandingan hasil REI-Dimo dan hasil ANN memiliki nilai eror kurang dari 0,5%. Ini menunjukkan bahwa ANN dapat digunakan sebagai strategi untuk telaah *steady state stability* pada sistem tenaga listrik.

# BAB VII

## **PENENTUAN BATAS STABILITAS *STEADY STATE* MENGUNAKAN KOMBINASI REI-DIMO DAN *EXTREME LEARNING MACHINE (ELM)***

Penelaahan ini bertujuan untuk menentukan nilai SSSL menggunakan REI-Dimo yang dikombinasikan dengan *Extreme Learning Machine*. Tahapan simulasinya sama seperti pada penelaahan menggunakan ANN untuk menentukan SSSL, yaitu sebagai berikut.

1. Sistem Jawa Bali direduksi menjadi model sistem tenaga listrik yang lebih sederhana menggunakan REI-Dimo.
2. Indeks batas stabilitas *steady-state* ditentukan dengan menggunakan REI-Dimo.
3. Mengubah daya pusat beban untuk memperoleh parameter sistem seperti daya aktif dan reaktif generator, besar dan sudut tegangan bus, Nilai  $D$  dan  $E$  dari model REI-Dimo, dan indeks SSSL.
4. Seluruh informasi (data) yang diperoleh pada langkah 3 akan digunakan sebagai data pelatihan, validasi, dan pemeriksaan.
5. Menentukan Indeks SSSL menggunakan ELM.
6. Membandingkan hasil ANN dan ELM.



**Gambar 51** Skema Peninjauan SSSL Menggunakan ELM

Seluruh informasi yang diperoleh dari REI-Dimo seperti daya aktif generator ( $P_{Gen}$ ), daya reaktif generator ( $Q_{Gen}$ ), tegangan seluruh bus, serta daya aktif dan reaktif pada beban akan digunakan sebagai data *input*, sementara tegangan pada pusat beban ( $V_{load\ center}$ ) dan indeks SSSL akan digunakan sebagai data *output* untuk strategi ELM. Seluruh informasi dilatih menggunakan 500 neuron tersembunyi dengan fungsi aktivasi sig.

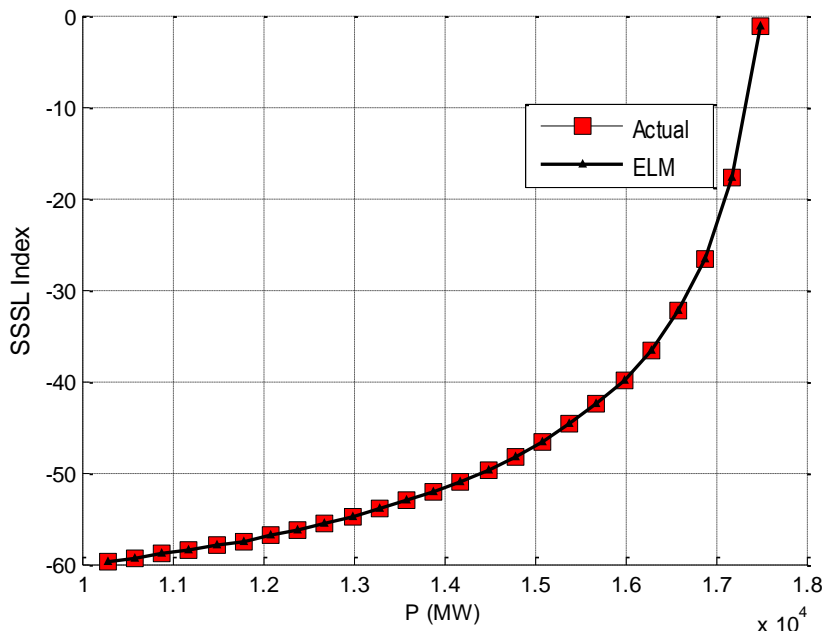
Hasil simulasi strategi REI-Dimo menunjukkan tegangan pusat beban kritis sebesar 0,781 (pu) dan nilai SSSL sebesar -1.2376 (pu). Proses pelatihan pada ELM memerlukan waktu selama 0,825 detik mendapatkan nilai tegangan pusat beban kritis sebesar 0,781 (pu) dan nilai SSSL sebesar -1,2376 (pu) dengan nilai training error sebesar 0%.

**Tabel 22** Beberapa Representasi Informasi yang Digunakan sebagai Informasi *Input* ELM

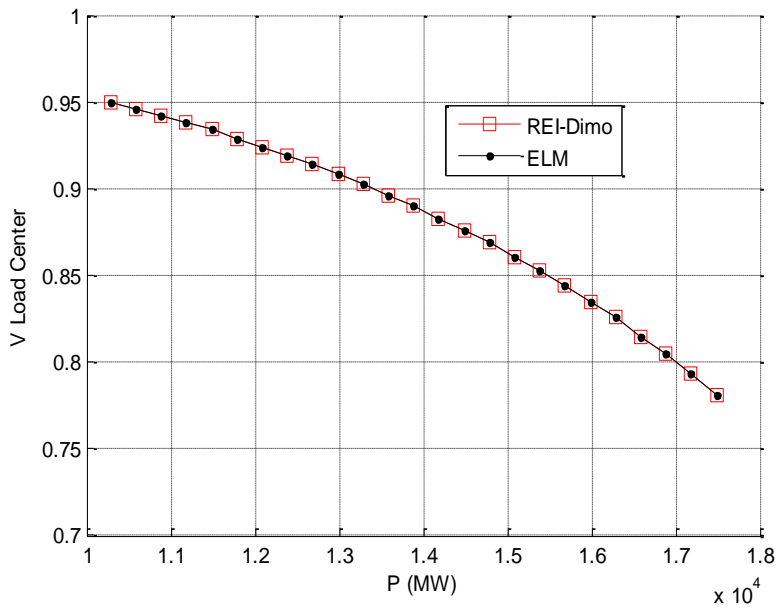
$P_1$	$Q_1$	$V_1$	$\theta_1$	...	$P_{Load}$	$Q_{Load}$	$V_{Load}$	$\theta_{Load}$	D	E	SSSL Index
1657.62	898.594	1.02	0	...	10282	4032	0.95	-26.7	61.07	120.7	-59.657
1905.77	969.249	1.02	0	...	10582	4148.14	0.946	-28.88	61.26	120.6	-59.294
2149.54	1046	1.02	0	...	10882	4265.74	0.942	-31.08	61.46	120.4	-58.895
2388.82	1128.7	1.02	0	...	11182	4383.34	0.938	-33.3	61.69	120.1	-58.458
2623.35	1217.23	1.02	0	...	11482	4500.94	0.934	-35.53	61.94	119.9	-57.98
2852.83	1311.47	1.02	0	...	11782	4618.54	0.929	-37.78	62.22	119.7	-57.456
3076.92	1411.29	1.02	0	...	12082	4736.14	0.924	-40.05	62.53	119.4	-56.883

ELM yang digunakan mempunyai 50 node *input* dan dua node *output*, serta hanya mempunyai satu *hidden layer*. Tipe aktivasi yang digunakan adalah Sigmoid.

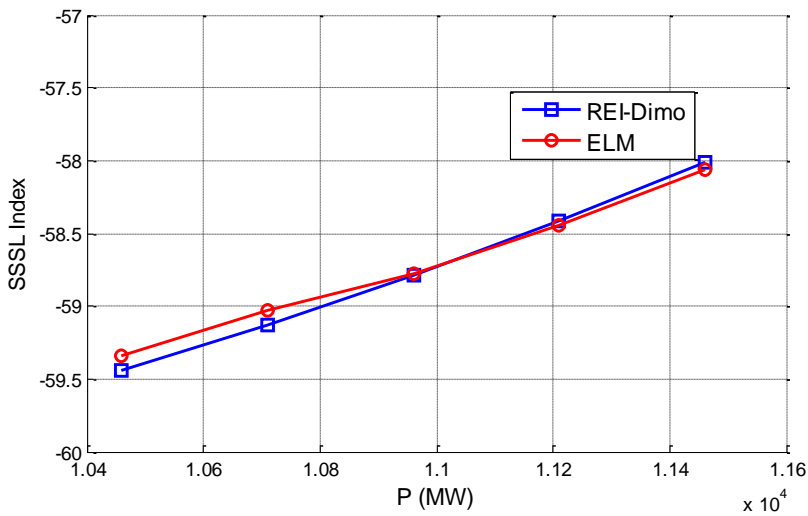
Pada penelaahan ini, kinerja ELM akan dibandingkan dengan hasil Artificial Neural Network. Gambar 52 dan gambar 53 menunjukkan hasil dari pelatihan ELM untuk dua parameter keluaran, yaitu indeks SSSL dan tegangan pusat beban.



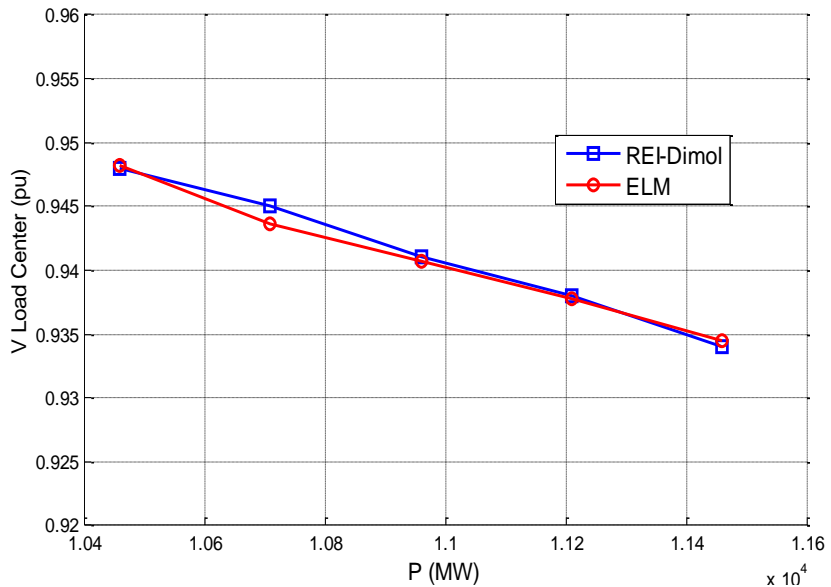
**Gambar 52** Perbandingan Nilai SSSL Indeks dan Daya pada Pusat Beban untuk REI-Dimo (Aktual) dan Hasil Pelatihan ELM



**Gambar 53** Perbandingan Nilai SSSL Indeks dan Tegangan pada Pusat Beban untuk REI-Dimo (Aktual) dan Hasil Pelatihan ELM



**Gambar 54** Perbandingan Nilai Indeks SSSL antara Informasi Aktual dan Hasil ELM



**Gambar 55** Perbandingan Nilai Tegangan pada Pusat Beban antara Informasi Aktual dan Hasil ELM

Setelah proses pelatihan dan pemeriksaan *Steady State Stability Assessment Extreme Learning Machine* (SSSELM), SSSELM dapat digunakan untuk informasi (data) pengoperasian sistem lainnya. SSSELM dapat mengestimasi nilai SSSL dengan memasukkan nilai parameter terukur seperti tegangan bus, sudut fasa, dan daya generator.

Sebagai contoh, untuk nilai operasi 10640 MW dan 4100.32 MVAR pada pusat beban, diperoleh nilai SSSL -59.4459. Kemudian dibuat skenario di mana beban pada pusat beban berubah dengan peningkatan sebesar 250 MW dan 98 MVAR.

Tabel 23 menunjukkan bahwa hasil perubahan daya pada pusat beban dari 10460 MW menjadi 11460 MW dan 4100,32 MVAR menjadi 4492,32 MVAR akan menghasilkan perubahan tegangan pusat beban dari 0,948 (pu) menjadi 0,934 (pu). Dapat dilihat bahwa seluruh kesalahan untuk nilai keluaran yang diberikan memiliki nilai kurang dari 0,23%. Nilai kesalahan tersebut masih dapat diterima sehingga dapat dikatakan bahwa strategi ELM dapat digunakan untuk menelaah *steady state stability* secara akurat. Pada Tabel 24–25 menunjukkan bahwa hasil ELM lebih

akurat daripada hasil ANN. Nilai maksimum kesalahan ELM adalah 0,06%, 0,17%, 0,1%, 0,23%, dan 0,03%. Adapun nilai maksimum kesalahan ANN adalah 0,45%, 0,32%, 0,24%, 0,19%, dan 0,57%. Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa tingkat kesalahan ELM lebih rendah daripada ANN.

**Tabel 23** Beberapa Informasi Pemeriksaan untuk ELM

<b>P Load Center (MW)</b>	<b>Q Load Center (MVAR)</b>	<b>V Load Center (pu)</b>	<b>θ Load Center (degree)</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>SSSL Index</b>
10460	4100.32	0.948	-27.993	61.1773	120.6233	-59.4459
10710	4198.32	0.945	-29.819	61.342	120.47	-59.128
10960	4296.32	0.941	-31.656	61.521	120.31	-58.785
11210	4394.32	0.938	-33.504	61.714	120.13	-58.415
11460	4492.32	0.934	-35.365	61.924	119.94	-58.016

**Tabel 24** Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Target untuk Indeks SSSL

<b>No. Data</b>	<b>Target</b>	<b>Pemeriksaan</b>		<b>Error</b>	
		<b>ANN</b>	<b>ELM</b>	<b>ANN</b>	<b>ELM</b>
1	-59.4459	-59.1794	-59.413	0.0045	0.0006
2	-59.128	-58.9366	-59.2311	0.0032	0.0017
3	-58.785	-58.6467	-58.7239	0.0024	0.001
4	-58.415	-58.3024	-58.2782	0.0019	0.0023
5	-58.016	-58.3482	-58.0314	0.0057	0.0003

Untuk ELM, fungsi aktivasi yang digunakan adalah sigmoid dengan jumlah neuron tersembunyi sebanyak 7000, waktu pelatihan rata-rata 0,2589, dan waktu pemeriksaan rata-rata 0,0295. Adapun untuk ANN, fungsi aktivasi yang digunakan adalah tansig dan purelin, dengan jumlah neuron tersembunyi sebanyak 1500, waktu pelatihan 0,54, dan waktu pemeriksaan 0,049.

**Tabel 25** Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Target untuk Tegangan pada *Load Center*

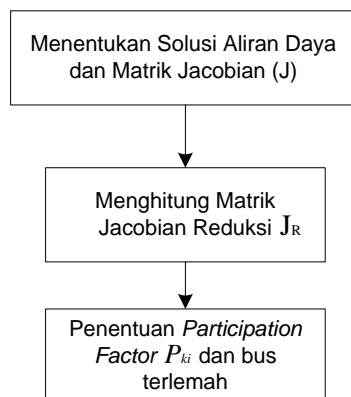
No. Data	Target	Pemeriksaan		Error	
		ANN	ELM	ANN	ELM
1	0.948	0.9457	0.9478	0.0024	0.0003
2	0.945	0.9428	0.9445	0.0023	0.0005
3	0.941	0.9398	0.9409	0.0013	0.0001
4	0.938	0.9366	0.9361	0.0015	0.0021
5	0.934	0.9364	0.9344	0.0025	0.0004

# BAB VIII

## STABILITAS *STEADY STATE* MENGGUNAKAN *EXTEREME LEARNING MACHINE* BERDASARKAN STRATEGI *MODAL ANALYSIS*

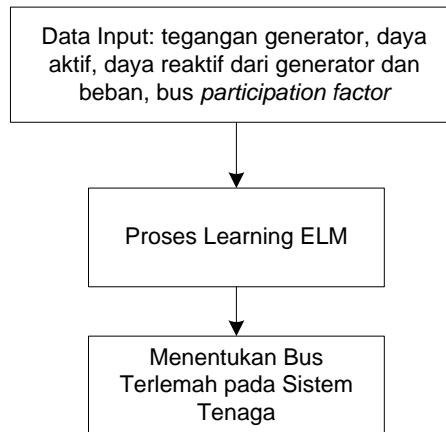
Penelaahan ini bertujuan untuk mengetahui bus terlemah pada sistem tenaga listrik dengan menggunakan strategi ELM yang sebelumnya telah dilatih menggunakan informasi yang diperoleh dari strategi *Modal Analysis*. Penentuan bus terlemah sangat penting dalam penelaahan *steady state stability* karena bus terlemah merupakan bus yang banyak memberikan kontribusi terhadap terjadinya situasi *voltage collapse*, yang akhirnya mengarah pada situasi pemadaman total atau *blackout*.

Langkah pertama dalam simulasi adalah menelaah aliran daya untuk sistem IEEE 14 bus dan sistem interkoneksi Jawa-Bali 500 kV. Kemudian dengan menggunakan strategi *Modal Analysis*, didapatkan bus terlemah pada setiap sistem. Informasi yang diperoleh dari strategi *Modal Analysis* dilatihkan pada strategi ELM.



**Gambar 56** Algoritma Strategi *Modal Analysis*

Nilai faktor partisipasi bus yang diperoleh dari strategi *Modal Analysis* dilatihkan pada ELM. Informasi *input* berupa tegangan generator bus, daya aktif dan reaktif generator, empat nilai faktor partisipasi terbesar, dan perubahan beban pada bus beban. Pada simulasi ini, informasi *input* yang digunakan sebanyak 150 data, dengan 30 data digunakan sebagai data pemeriksaan. Algoritma untuk penelaahan ini ditunjukkan pada Gambar 57.



**Gambar 57** Proses Simulasi Strategi ELM dalam Penentuan Bus Terlemah

Gambar 58 dan 59 menunjukkan hasil faktor partisipasi bus dari strategi *Modal Analysis* untuk sistem Jawa-Bali 500 kV dan sistem IEEE-14 bus. Pada simulasi ini juga didapatkan hubungan antara perubahan daya pada beban dengan nilai faktor partisipasi bus.

Daya bus nomor 4 diubah sehingga setiap perubahan ini menghasilkan nilai faktor partisipasi baru untuk seluruh bus beban. Nilai faktor partisipasi digunakan sebagai data *input* untuk ELM. Pada kasus IEEE 14 bus, data faktor partisipasi dibatasi pada empat bus yang dengan faktor partisipasi bus terbesar, yaitu bus 9, bus 10, bus 11, dan bus 14.

Informasi daya aktif dan reaktif generator, tegangan bus generator, tegangan bus beban, dan perubahan beban pada bus 4 digunakan sebagai data *input*, sedangkan empat nilai faktor partisipasi terbesar digunakan

sebagai data *output* untuk strategi ELM, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 30.

**Tabel 26** Matriks Jacobian Reduksi Sistem Jawa-Bali 500kV

Kolom 1-6

150.8261741	-0.005749627	-0.674033929	-6.597532958	-0.005513287	-0.006411263
-1.33E-16	55.67742167	-56.04112607	-9.93E-17	-3.07E-18	-2.81E-18
-0.631137693	-56.26968629	292.4611773	-79.98988934	-0.0113262	-0.013484709
-6.706136938	-0.004736142	-81.31880012	145.4021875	-0.007549342	-22.49101495
-1.70E-05	1.55E-07	-8.23E-06	0.00059588	68.84983131	-51.16992342
0.000170427	-1.55E-06	8.25E-05	-22.73373568	-50.77478169	73.1797657
0.000620465	-5.66E-06	0.000300286	-0.029265883	-0.000554349	0.010535594
0.003345685	-3.05E-05	0.001619209	0.025911028	1.34E-06	0.001163691
0.002863927	-2.61E-05	0.001386053	0.022179996	1.15E-06	0.000996127
0.00122002	-1.11E-05	0.000590452	0.009448576	4.90E-07	0.000424345
0.000249947	-2.28E-06	0.000120967	0.001935744	1.00E-07	8.69E-05
-0.005634171	5.14E-05	-142.8137344	-0.043634457	-2.26E-06	-0.001959669
-0.008931992	8.15E-05	-0.004322811	-0.069174794	-3.59E-06	-0.003106712
-0.00403593	3.68E-05	-0.001953267	-0.031256708	-1.62E-06	-0.001403771
0.000161505	-1.47E-06	7.82E-05	0.001250796	6.49E-08	5.62E-05

Kolom 7-12

-0.01121244	-0.076676302	-0.002364803	-0.010638365	-0.083662736	-0.009991498
-4.63E-18	-1.38E-16	3.31E-17	-4.03E-18	-3.47E-17	8.71E-17
-0.024168943	-0.166735473	-0.010406372	-0.025225447	-0.181165622	-142.8579921
-0.061605663	-0.11392121	0.016837152	-0.007718507	-0.127247561	-0.047013919
-0.000892419	0.00020985	-7.68E-05	-3.99E-06	0.000241031	0.000159025
0.00894406	-0.002103176	0.000770015	4.00E-05	-0.00241568	-0.001593791
74.00957774	-0.007656938	0.002803361	0.000145551	-0.00879466	-0.005802443
0.004205615	52.53283478	-13.67285739	0.000784844	-0.047422787	-0.031288078
0.003600032	-13.74761629	20.55588423	-7.062606737	-0.040594191	-0.026782784
0.001533597	0.012454182	-7.273850981	29.91712645	-6.196216947	-0.011409342
0.00031419	0.002551507	0.001535304	-6.467856096	99.56319965	-0.002337449
-0.007082303	-0.057514644	-0.034607959	-0.021028112	-0.058001506	148.5820738
-0.011227751	-0.091179401	-0.054864862	-0.033336391	-0.091951236	-6.023408356
-0.005073272	-0.041199514	-0.024790749	-10.78054928	-0.041278876	0.037743092
0.000203016	0.001648676	0.000992048	0.006054747	0.008392878	-0.00151036

Kolom 13-15

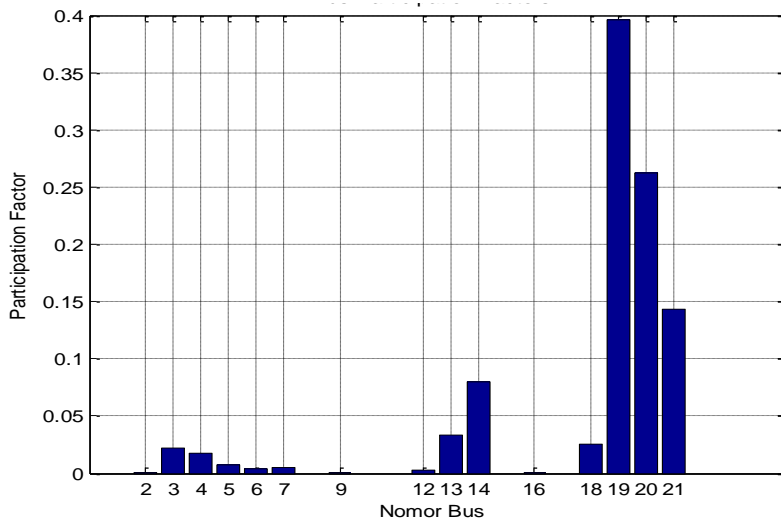
-0.017262257	-0.010575843	-0.000485775
-3.95E-17	-1.87E-17	-4.90E-19
-0.021065557	-0.014098809	-0.001363582
-0.089327282	-0.050115454	0.000466069

0.000307909	0.000169766	-3.53E-06
-0.003085949	-0.001701442	3.54E-05
-0.011234878	-0.006194362	0.000128897
-0.060580994	-0.033401396	0.000695044
-0.051857696	-0.028591796	0.000594962
-0.022091139	-10.82000902	0.00573302
-0.004525845	0.000694226	0.003551017
-5.964549107	0.047572743	-0.002280809
11.12560801	-5.334570413	-0.003615823
-5.526917979	23.87646533	-8.13206158
-0.002924409	-8.383701973	16.34096632

**Tabel 27** Nilai *Eigen* dari Matriks Jacobian Reduksi Sistem Jawa-Bali 500 kV

405.8962726
158.0446929
147.0245465
116.3394738
100.1517792
75.71220756
74.00937724
57.86444442
40.13027367
5.149100849
24.05663207
21.39130745
9.8506599
13.07438522
14.20514045

Tabel 26 menunjukkan nilai matriks Jacobian untuk sistem Jawa-Bali 500 kV. Dimensi matriks Jacobian reduksi ini adalah 15 x 15. Kemudian diperoleh nilai *eigen* dari matriks Jacobian reduksi ini, seperti yang terlihat pada Tabel 27. Dapat dilihat pada Tabel 27 bahwa seluruh nilai *eigen* adalah positif, dengan nilai *eigen* terendah adalah 5,149100849. Hal ini menunjukkan bahwa sistem Jawa-Bali 500 kV dalam kondisi stabil.



**Gambar 58** Nilai *Bus Participation Factor* untuk Sistem Jawa-Bali 500 kV

Setelah mendapatkan nilai *eigen* dari matriks Jacobian reduksi, kemudian dilakukan penentuan nilai faktor partisipasi bus dari mode nilai *eigen* terkecil. Nilai faktor partisipasi bus untuk sistem Jawa-Bali 500 kV ditunjukkan pada Gambar 58.

**Tabel 28** Matriks Jacobian Reduksi Sistem IEEE 14 Bus

Kolom 1-5

27.33874477	-18.99654494	-3.738164687	-1.222601438	0.002421285
-20.04197653	31.22037653	-0.034582604	-0.323733007	-0.033869178
-4.675180627	0.012790992	18.59710787	-8.636732604	0.000583433
-1.758897241	-0.066634253	-8.762042753	25.30608066	-11.35026588
0.002554919	-0.005886756	-0.002226992	-11.55143694	16.55522223
0.002713342	-0.006251776	-0.002365081	-0.0145369	-5.296557761
-0.003319669	0.007648806	0.002893585	0.033330661	-0.00203801
0.004671367	-0.010763234	-0.00407179	-0.046902184	0.002867843
-0.000466272	0.001074331	0.000406425	-3.645757331	-0.000286254

Kolom 6-9

0.00320211	-0.028692562	-0.003135509	-0.007319865
-0.035347926	0.011757526	-0.06869134	-0.036052233
0.000685952	-0.0033811	0.000265023	-0.000508464
-0.002099	0.022040054	-0.004725325	-3.497166435
-5.074734264	-0.002187214	0.002706598	0.001085877
10.37289352	-0.002322836	0.002874426	0.001153209
-0.002178727	8.564990712	-4.769452678	0.00747334
0.003065857	-4.620446652	15.52980088	-2.965725423
-0.000306018	-0.001375618	-2.795483651	6.315310028

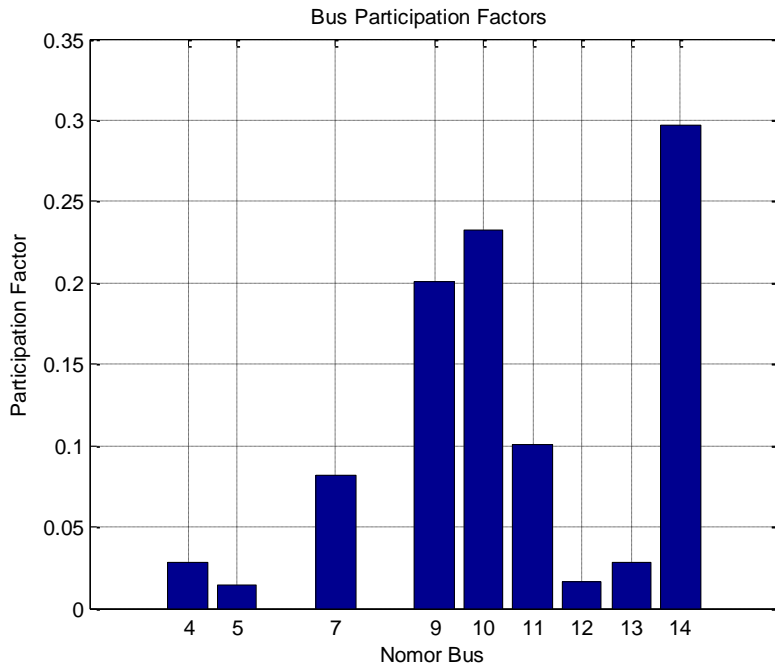
Tabel 28 menunjukkan nilai matriks Jacobian dari sistem IEEE 14 bus. Dimensi matriks Jacobian reduksi ini adalah 9 x 9. Kemudian didapatkan nilai *eigen* dari matriks Jacobian reduksi ini, seperti yang terlihat pada Tabel 29. Terlihat dari tabel tersebut bahwa seluruh nilai *eigen* memiliki nilai positif, dan nilai *eigen* terendah adalah 2,489998. Hal ini menandakan bahwa sistem IEEE 14 bus dalam kondisi stabil.

Setelah mendapatkan nilai *eigen* matriks Jacobian reduksi, kemudian dilakukan penentuan nilai faktor partisipasi bus dari mode nilai *eigen* terkecil. Nilai faktor partisipasi bus untuk sistem IEEE 14 bus ditunjukkan pada Gambar 59.

**Tabel 29** Nilai *Eigen* Matriks Jacobian Reduksi Sistem IEEE 14 Bus

49.14476
36.73019
19.39642
18.44869
12.69041
2.489998
5.256852
8.358432
7.284766

Dapat dilihat pada Gambar 59 bahwa bus 14 merupakan bus dengan nilai partisipasi terbesar sehingga bus ini merupakan bus yang berperan menentukan ketidakstabilan sistem IEEE 14 bus.



**Gambar 59** Nilai *Bus Participation Factor* untuk Sistem IEEE 14 Bus

**Tabel 30** Beberapa Representasi Informasi *Input* untuk ELM pada Kasus IEEE 14 Bus

PI	Q1	V1	...	V2	V3	V6	V8	PL4	QL4	PF9	PF10	PF11	PF14
Real Power G1	Reactive Power G1	Bus Voltage	...	Bus Voltage	Bus Voltage	Bus Voltage	Bus Voltage	Real Power Bus Load	Reactive Power Bus Load	Part. factor bus 9	Part. factor bus 10	Part. Factor bus 11	Part. factor bus 14
1.517	0.308	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	0.967	0.3383	0.1912	0.2319	0.1095	0.327
1.528	0.306	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	0.977	0.338	0.1912	0.2319	0.1095	0.327
1.551	0.314	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	0.997	0.438	0.1914	0.232	0.1094	0.3266
1.564	0.324	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.007	0.538	0.1914	0.2321	0.1094	0.3262
1.679	0.331	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.107	0.738	0.1921	0.2323	0.109	0.3254
1.794	0.326	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.207	0.8383	0.1924	0.2325	0.1089	0.3249
1.91	0.322	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.307	0.9383	0.1927	0.2326	0.1087	0.3243
2.027	0.319	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.407	1.038	0.193	0.2327	0.1085	0.3237
2.145	0.317	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.507	1.138	0.1933	0.2328	0.1083	0.3231
2.265	0.315	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.607	1.238	0.1936	0.233	0.1081	0.3225

Tabel tersebut menunjukkan sejumlah contoh informasi *input* untuk ELM dalam kasus IEEE 14 bus. Perubahan daya pada bus nomor 4 menyebabkan perubahan daya generator dan nilai faktor partisipasi pada keempat bus, yaitu bus 14, bus 10, bus 9, dan bus 11. Sebagai contoh,

untuk perubahan beban pada bus 4 dengan P sebesar 0,967 pu dan Q sebesar 0,3383 pu, maka daya generator pertama adalah P1 sebesar 1,517 pu, Q1 sebesar 0,308 pu, dan nilai faktor partisipasi terbesar pada bus 14 sebesar 0,327, diikuti oleh bus 10 sebesar 0,2319, bus 9 sebesar 0,1912, dan bus 11 sebesar 0,1095.

Fungsi aktivasi yang digunakan dalam simulasi ini adalah sigmoid. Setelah dilakukan simulasi, didapatkan hasil sebagai berikut.

Akurasi pemeriksaan rata-rata	= 2.6383e-004
Akurasi pelatihan rata-rata	= 3.1689e-024
Waktu pelatihan rata-rata	= 0.1477
Waktu pemeriksaan rata-rata	= 0.0233

Proses pelatihan menunjukkan bahwa waktu pelatihan dan kesalahan adalah kecil sehingga dapat disimpulkan bahwa ELM dapat digunakan untuk memperkirakan *Modal Analysis* dan untuk penelaahan *steady state stability*.

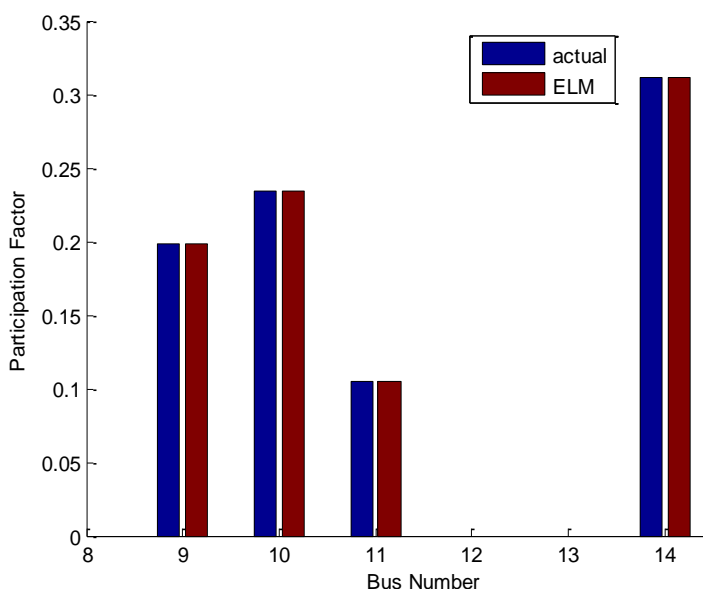
Untuk kasus Jawa-Bali, beban yang diubah adalah beban pada bus 12. Dengan langkah simulasi yang sama dengan simulasi sistem untuk kasus IEEE-14 bus, diperoleh nilai faktor partisipasi dengan kesalahan maksimum 0,0764.

Akurasi pemeriksaan rata-rata	= 0.0019
Waktu pelatihan rata-rata	= 0.0324
Waktu pemeriksaan rata-rata	= 0.0030
Akurasi pemeriksaan	= 7.0417e-004
Waktu pelatihan	= 0.0313
Akurasi pelatihan	= 1.1445e-016

**Tabel 31** Beberapa Informasi *Input Extreme Learning Machine* untuk Sistem Jawa-Bali 500 kV

P1	Q1	V1	...	PL12	QL12	PF14	PF19	PF20	PF21
Real Power G1	Reactive Power G1	Bus Voltage G1	..	Real Power Bus Load 12	Reactive Power Bus Load 12	Part. factor bus 14	Part. factor bus 19	Part. Factor bus 20	Part. factor bus 21
3.323	0.957	1.02	...	0.59	0.351	0.0867	0.3688	0.281	0.1657
3.426	0.963	1.02	...	0.69	0.451	0.0868	0.3686	0.281	0.1656
3.529	0.97	1.02	...	0.79	0.551	0.0869	0.3683	0.281	0.1655
3.633	0.978	1.02	...	0.89	0.651	0.087	0.3681	0.2809	0.1654
3.737	0.986	1.02	...	0.99	0.751	0.0871	0.3679	0.2809	0.1653
3.84	0.996	1.02	...	1.09	0.851	0.0873	0.3676	0.2808	0.1652
3.945	1.006	1.02	...	1.19	0.951	0.0874	0.3674	0.2808	0.1651
4.049	1.017	1.02	...	1.29	1.051	0.0875	0.3671	0.2807	0.165
4.154	1.029	1.02	...	1.39	1.151	0.0876	0.3669	0.2807	0.1648
4.259	1.042	1.02	...	1.49	1.251	0.0877	0.3667	0.2806	0.1647
4.364	1.055	1.02	...	1.59	1.351	0.0878	0.3665	0.2805	0.1646
4.47	1.07	1.02	...	1.69	1.451	0.0879	0.3662	0.2804	0.1644
4.576	1.085	1.02	...	1.79	1.551	0.088	0.366	0.2803	0.1643

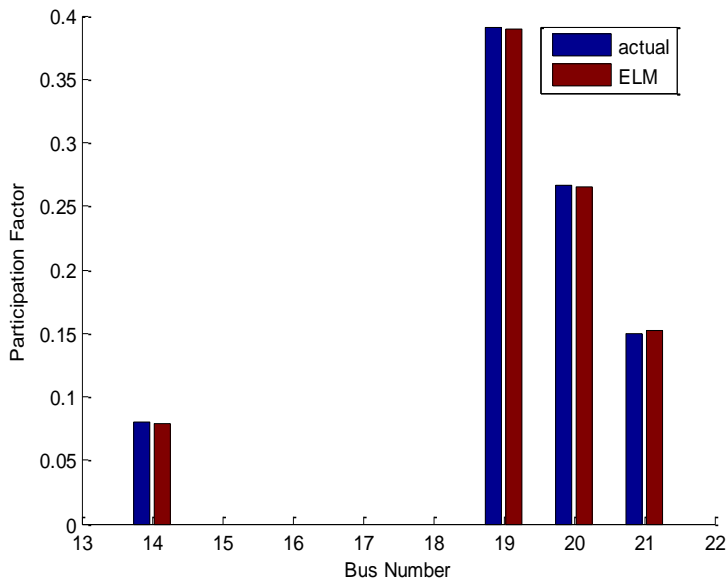
Tabel 31 menunjukkan beberapa representasi informasi *input* untuk ELM pada kasus Jawa-Bali 500 kV. Perubahan daya pada bus 12 menyebabkan perubahan daya generator dan nilai faktor partisipasi pada keempat bus, yaitu bus 9, bus 20, bus 21, dan bus 14. Misalnya untuk perubahan beban pada bus 12 dengan P sebesar 0,59 pu dan Q sebesar 0,351 pu, maka generator pertama menghasilkan P1 sebesar 3,323 pu, Q1 sebesar 0,957 pu, dan nilai faktor partisipasi terbesar pada bus 9 sebesar 0,3688. diikuti oleh bus 20 sebesar 0,281, bus 21 sebesar 0,1657, dan bus 14 sebesar 0,0867.



**Gambar 60** Perbandingan Hasil *Modal Analysis* dan Hasil ELM untuk Sistem IEEE 14 Bus

Setelah melalui proses pembelajaran, ELM diperiksa dengan menggunakan data pemeriksaan. Informasi (data) tersebut tidak dimasukkan dalam proses pelatihan. Gambar 60 menunjukkan perbandingan empat faktor partisipasi bus pada sistem IEEE-14 bus. Bus terlemah adalah bus 14, diikuti oleh bus 10, bus 9, dan bus 11. Ketika bus beban berubah, nilai faktor partisipasi akan berubah.

Pada sistem Jawa-Bali, bus dengan nilai faktor partisipasi terbesar adalah bus 19, diikuti oleh bus 20, bus 21, dan bus 14. Bus 12 (Bandung Selatan) digunakan sebagai bus yang mengalami perubahan beban, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 61. Setiap perubahan bus beban akan memengaruhi perubahan nilai daya pembangkitan, tegangan terminal generator, tegangan bus beban, dan nilai faktor partisipasi bus. Seluruh nilai perubahan ini diajarkan kepada ELM.



**Gambar 61** Perbandingan Hasil *Modal Analysis* dan Hasil ELM untuk Sistem Jawa-Bali

**Tabel 32** Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Hasil ELM untuk Sistem IEEE 14 Bus

Pemeriksaan Data PF	Learning PF	Errors
0.1049	0.105	0.003
0.1045	0.1048	0.0101
0.1039	0.1046	0.0244
0.1034	0.1043	0.0495
0.3114	0.3119	0.0007
0.3098	0.3115	0.0025
0.3079	0.3117	0.0052
0.3058	0.3127	0.0105

Seluruh informasi (data) aktual dan informasi pembelajaran nilai faktor partisipasi yang diperoleh dari ELM dibandingkan. Nilai eror yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 32 dan Tabel 33. Nilai eror tersebut menunjukkan bahwa ELM sangat akurat dan cepat dalam menentukan bus terlemah dalam penelaahan stabilitas tegangan.

**Tabel 33** Perbandingan Informasi Pemeriksaan dan Hasil ELM untuk Sistem Jawa-Bali

<b>Pemeriksaan Data PF</b>	<b><i>Learning</i> PF</b>	<b><i>Errors</i></b>
0.361	0.3621	0.0006
0.3608	0.3651	0.001
0.3605	0.3771	0.0102
0.3603	0.3878	0.0049
0.3601	0.4471	0.0518
0.2764	0.2749	0.0031
0.2761	0.2717	0.0118
0.2758	0.2619	0.0461
0.2755	0.2433	0.0764

Pada penelaahan ini, hasil estimasi yang diperoleh dengan strategi ELM menunjukkan bahwa strategi tersebut mampu memprediksi kondisi stabilitas tegangan sistem tenaga listrik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tingkat kesalahan dari nilai keluaran *Modal Analysis* dan ELM kurang dari 0,07, dan nilai ini dapat diterima. Ini menandakan bahwa ELM sangat cocok untuk menelaah stabilitas *steady state*, dan sangat cocok diterapkan pada *online steady state monitoring* pada sistem tenaga.

# BAB IX

## **ACTIVE POWER RESCHEDULING UNTUK MENINGKATKAN INDEKS STABILITAS *STEADY STATE***

Strategi yang diusulkan dalam penelaahan ini didasarkan pada nilai impedansi ekuivalen Thevenin antara masing-masing beban terhadap masing-masing generator. Nilai impedansi ini menggambarkan jarak listrik *point to point* antara beban tertentu terhadap generator tertentu. Dilihat dari penelaahan stabilitas *steady state*, generator dengan nilai impedansi beban lebih kecil atau jarak terpendek akan memiliki tingkat stabilitas yang lebih baik. Hal ini dikarenakan transfer daya maksimum ke beban menjadi lebih besar sehingga batas stabilitas *steady state* meningkat. Generator yang impedansinya paling dekat dengan beban akan berjalan dengan daya maksimum, dan pembangkit lainnya akan berjalan secara berurutan sesuai dengan nilai impedansi Thevenin. Dengan strategi ini, diharapkan tingkat stabilitas sistem akan lebih baik.

Dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga, mode operasi ekonomis merupakan pertimbangan yang sangat penting. Namun, penerapan mode operasi ekonomis terkadang membuat sistem kurang aman dalam hal stabilitas. Penelaahan ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh strategi optimasi generator terhadap stabilitas *steady state* sistem.

Strategi penjadwalan generator menggunakan *Genetic Algorithm* (GA), *Neural Network-Genetic Algorithm* (NN-GA), *Merit Order*, Lagrange akan dibandingkan dengan strategi yang diusulkan dalam peninjauan ini, yaitu strategi impedansi Thevenin<sup>[45]</sup>. Untuk mengetahui pengaruh mode operasi sistem terhadap stabilitas *steady state*, maka digunakan strategi *REI-Dimo Equivalent* pada peninjauan ini.

Pada peninjauan ini, digunakan sistem Jawa-Bali 500 kV sebagai contoh kasus yang akan ditelaah. Simulasi ini dimulai dengan menentukan matriks impedansi Thevenin. Berdasarkan hasil matriks ini, akan ditentukan generator mana yang akan bekerja dengan daya maksimum

terlebih dahulu. Generator dengan nilai impedansi beban terendah akan diutamakan.

**Tabel 34** Matriks Thevenin antara Pembangkit dan Beban

LOAD/GEN	G1(1)	G2(8)	G3(10)	G4(11)	G5(15)	G6(17)	G7(22)	G8(23)
L1(2)	0.36016	0.35867	0.35879	0.35919	0.35195	0.35303	0.35315	0.35331
L2(3)	0.53736	0.53814	0.5383	0.53882	0.52966	0.53104	0.53121	0.5314
L3(4)	0.19171	0.19211	0.19219	0.19245	0.18782	0.18852	0.1886	0.1887
L4(5)	0.3986	0.39967	0.39979	0.4002	0.39242	0.39354	0.39367	0.39383
L5(6)	0.49969	0.50191	0.50153	0.50187	0.49289	0.49415	0.49428	0.49448
L6(7)	0.31239	0.31379	0.31363	0.31391	0.30735	0.30828	0.30838	0.30852
L7(9)	0.65029	0.65351	0.65389	0.65394	0.64246	0.644	0.64414	0.6444
L8(12)	0.31078	0.31227	0.31309	0.31367	0.3066	0.30757	0.30762	0.30781
L9(13)	0.08231	0.08283	0.08311	0.08332	0.08153	0.08186	0.08185	0.081942
L10(14)	0.09260	0.09319	0.09348	0.09374	0.09362	0.09398	0.09738	0.094051
L11(16)	0.72847	0.73035	0.73126	0.73209	0.73315	0.74001	0.73793	0.73938
L12(18)	2.07E-07	1.54E-07	1.42E-07	1.07E-07	7.17E-07	6.23E-07	6.11E-07	5.98E-07
L13(19)	0.026574	0.02671	0.02676	0.02684	0.02611	0.02633	0.02638	0.026396
L14(20)	0.2049	0.20559	0.20592	0.20623	0.20538	0.20632	0.20665	0.20662
L15(21)	1.6824	1.6913	1.6955	1.6995	1.6946	1.7143	1.7258	1.7215

Langkah berikutnya membandingkan proses optimasi generator dengan menggunakan strategi GA, NN-GA, *Merit Order*, Lagrange, dan strategi impedansi Thevenin. Hasil dari proses optimasi ini ditunjukkan pada Tabel 35–38.

**Tabel 35** Hasil Optimasi Pembangkit Menggunakan Strategi GA [45]

	G A		Losses	Cost
	MW	MVAR	MW	Rp/h
Suralaya	3.270,623	1.167,928		588.754.120,910
Muara Tawar	1.348,993	1.488,733		4.708.218.371,135
Cirata	927,384	-118,538		5.564.301,851
Saguling	698,226	409,859		3.841.638,239
Tanjung Jati	769,286	360,736		137.111.697,050
Gresik	773,984	598,817		694.274.066,126
Paiton	2.331,685	871,681		379.101.501,366
Grati	245,566	368,910		611.103.504,856

**Tabel 36** Hasil Optimasi Pembangkit Menggunakan Strategi NN-GA <sup>[45]</sup>

	N N - G A		Losses MW	Cost Rp/h
	MW	MVAR		
Suralaya	4.055,218	1.225,698		520.182.141,271
Muara Tawar	1.070,795	1.548,305		3.553.671.142,407
Cirata	824,615	-107,882		4.947.690,270
Saguling	732,56	404,30		4.053.232,005
Tanjung Jati	1.534,716	374,051		249.461.677,344
Gresik	244,182	659,347		211.253.937,803
Paiton	1.719,399	856,884		226.766.953,028
Grati	199,505	360,847		507.808.157,848
<b>Total</b>	<b>10.385,114</b>	<b>5.339,986</b>		<b>103,114</b>

**Tabel 37** Hasil Optimasi Pembangkit Menggunakan Strategi Merit Order

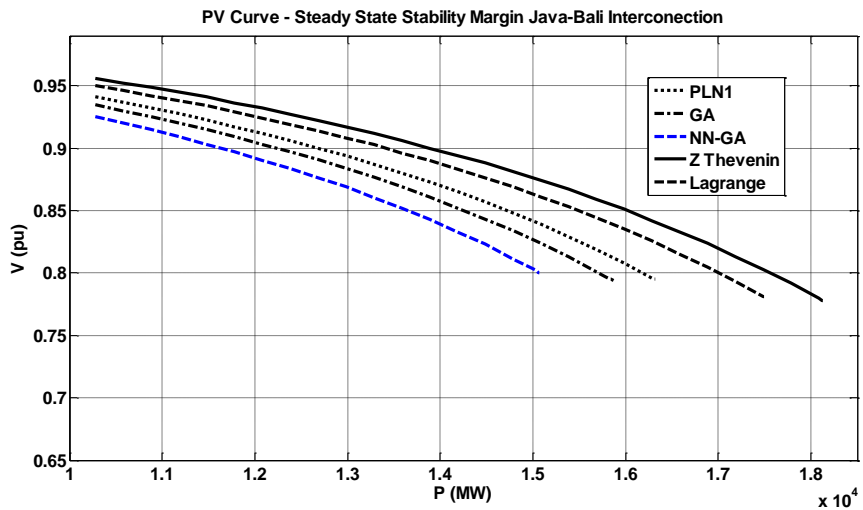
	P	Q	Losses	Cost
Suralaya	3.332,18	988,56		586.309.219,13
Muara Tawar	1.470,00	679,36		5.243.786.025,07
Cirata	400,00	484,32		2.400.000,00
Saguling	535,00	1.043,09		2.943.570,00
Tanjung Jati	830,00	361,87		146.959.544,62
Gresik	810,00	608,62		729.802.889,66
Paiton	2.820,00	895,04		528.641.810,78
Grati	198,00	395,97		504.471.401,82
<b>Total</b>	<b>10.395,18</b>	<b>5.456,83</b>		<b>113,18</b>

**Tabel 38** Hasil Optimasi Pembangkit Menggunakan Impedansi Thevenin

	P	Q	Losses	Cost
Suralaya	3.332,18	988,56		555.580.704,689
Muara Tawar	1040	679,36		3.432.443.588,97
Cirata	400	484,32		2.400.000
Saguling	500	1.043,09		2.943.570
Tanjung Jati	1220	361,87		206.371.271,02
Gresik	1050	608,62		975.310.354,46
Paiton	3254	895,04		682.439.575,6
Grati	827	395,97		2.109.823.210,09
<b>Total</b>	<b>10.395,18</b>	<b>5.456,83</b>		<b>113,18</b>

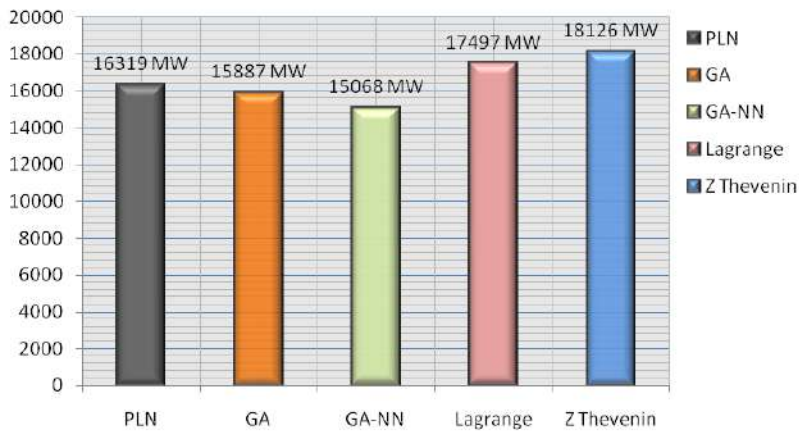
Dari simulasi yang dilakukan, didapatkan nilai *steady state stability limit* (SSSL) untuk masing-masing strategi optimasi generator. Gambar 62 menunjukkan bahwa nilai SSSL dari strategi impedansi Thevenin ekuivalen adalah yang tertinggi, diikuti oleh Lagrange, *Merit Order*, GA, dan NN-GA.

Strategi impedansi Thevenin dapat meningkatkan stabilitas sistem. Oleh karena itu, strategi ini perlu digunakan terutama pada kondisi operasi beban puncak yang rawan ketidakstabilan. Seperti yang terlihat pada Tabel 38 bahwa untuk pengoperasian dengan strategi impedansi Thevenin diperoleh SSSL sebesar 18126 MW. Diikuti oleh strategi Lagrange sebesar 17497 MW, *Merit Order* sebesar 16319 MW, GA sebesar 15887 MW, dan NN-GA sebesar 15068 MW.



**Gambar 62** Kurva PV Sistem Interkoneksi Jawa Bali untuk Metode Optimasi yang Berbeda

**Tabel 39** Perbandingan *Steady State Stability Limit* untuk Strategi Operasi yang Berbeda

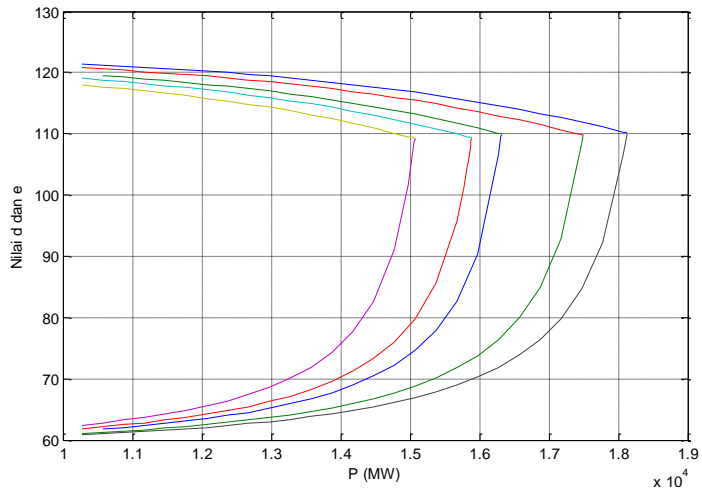


Batas beban maksimum dipengaruhi oleh nilai impedansi antara beban dengan generator. Semakin kecil nilai impedansi, maka transfer daya maksimum akan semakin besar. Hubungan tersebut dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$P = \frac{E_S E_R}{X_T} \sin(\delta_S - \delta_R) \quad (82)$$

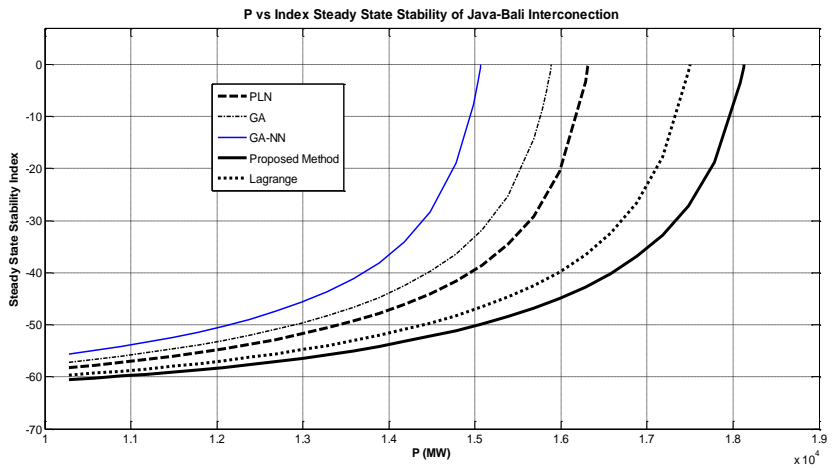
Pengoperasian generator disesuaikan dengan nilai impedansi *point-to-point* antara generator dan beban dengan menggunakan strategi impedansi Thevenin. Generator dengan nilai impedansi terendah akan diprioritaskan untuk operasi maksimum, diikuti oleh pembangkit lainnya sesuai dengan nilai impedansi yang diperoleh. Nilai daya aktif beban (P) akan meningkat seiring dengan peningkatan nilai  $E_S$  dan  $E_R$  serta penurunan nilai  $X_T$ .

Gambar 63 menjelaskan hubungan P terhadap perubahan nilai d dan e, yaitu bahwa semakin rendah nilai d dan semakin besar nilai e, maka batas stabilitas *steady state* akan semakin meningkat. Di antara seluruh strategi optimasi yang ditelaah dalam tinjauan ini, strategi impedansi Thevenin memiliki nilai d terendah dan nilai e terbesar sehingga strategi ini memiliki batas stabilitas *steady state* terbesar.



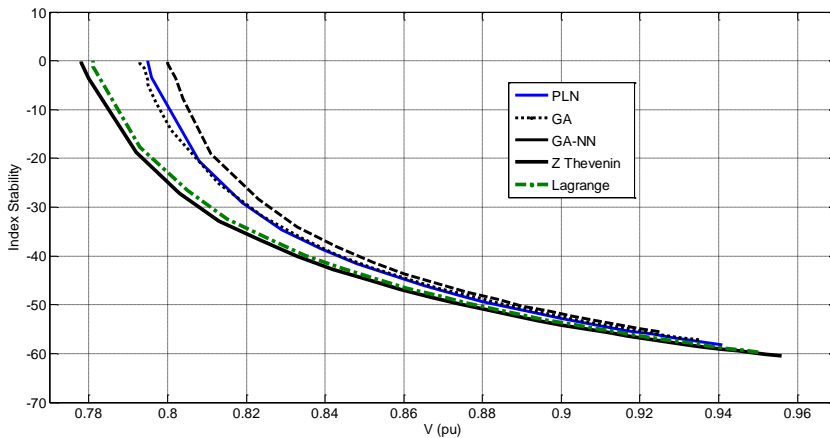
**Gambar 63** Hubungan P dengan Perubahan Nilai d dan e

Pada Gambar 64, kemiringan antara perubahan daya dan perubahan indeks stabilitas akan memberikan informasi tentang stabilitas *steady state*. Dengan menggunakan strategi optimasi NN-GA, diperoleh kemiringan yang besar sehingga setiap perubahan daya beban menyebabkan perubahan stabilitas yang lebih besar.



**Gambar 64** Hubungan Daya Aktif dan Nilai Indeks Stabilitas

Hubungan antara perubahan tegangan dan perubahan nilai indeks stabilitas ditunjukkan pada Gambar 65. Dapat dilihat dari gambar tersebut bahwa perubahan tegangan yang sama menghasilkan laju perubahan indeks stabilitas yang berbeda. Strategi impedansi Thevenin memiliki penurunan indeks stabilitas terendah sehubungan dengan penurunan tegangan. Hal ini menunjukkan bahwa ketika peningkatan beban di pusat beban menyebabkan penurunan tegangan, hal itu menyebabkan penurunan indeks stabilitas yang tidak sebesar dibandingkan dengan strategi optimasi lainnya. Oleh karena itu, telaah stabilitas *steady state* dengan strategi operasi impedansi Thevenin akan dapat meningkatkan stabilitas sistem.



**Gambar 65** Hubungan Tegangan dan Nilai Indeks Stabilitas

Batas pembebanan ini diperoleh dari memodelkan sistem Jawa-Bali 500 kV ke dalam bentuk *REI-Dimo Equivalent*.

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos\delta_m} - 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{load} \right) V \quad (83)$$

Berdasarkan persamaan (83), penentuan hubungan pola ekonomis dan indeks stabilitas yang dinyatakan dengan nilai  $\frac{d\Delta Q}{dV}$  ditentukan oleh perubahan parameter  $V$  dan  $\cos\delta_m$ . Semakin dekat jarak generator yang

memberi daya ke beban, semakin tinggi nilai  $\cos\delta_m$  karena perbedaan antara sudut bus kirim dan terima semakin kecil, sehingga nilai  $d = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos\delta_m}$  akan memiliki nilai yang lebih kecil, dan  $e = 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{load} \right) V$  akan memiliki nilai yang lebih besar. Nilai d yang kecil dan nilai e yang besar menyebabkan jarak yang lebih jauh untuk menuju  $d = e$  atau  $\frac{d\Delta Q}{dV} = 0$ . Inilah yang membuat strategi ini mampu meningkatkan batas stabilitas sistem.

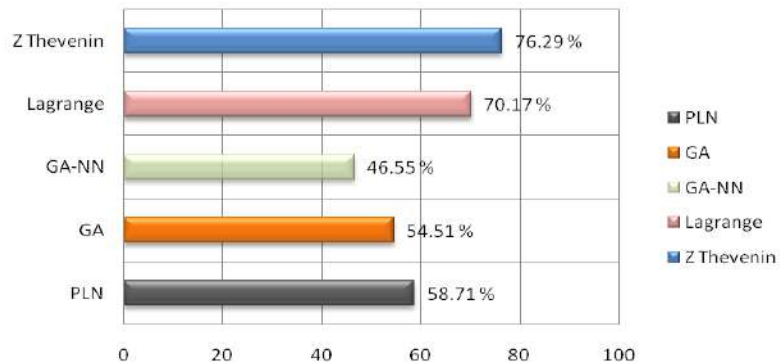
Penentuan cadangan stabilitas daya dan cadangan stabilitas tegangan dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$\text{Power Stability Reserve} = \frac{P_{max} - P_{base\ case}}{P_{base\ case}} \times 100\% \quad (84)$$

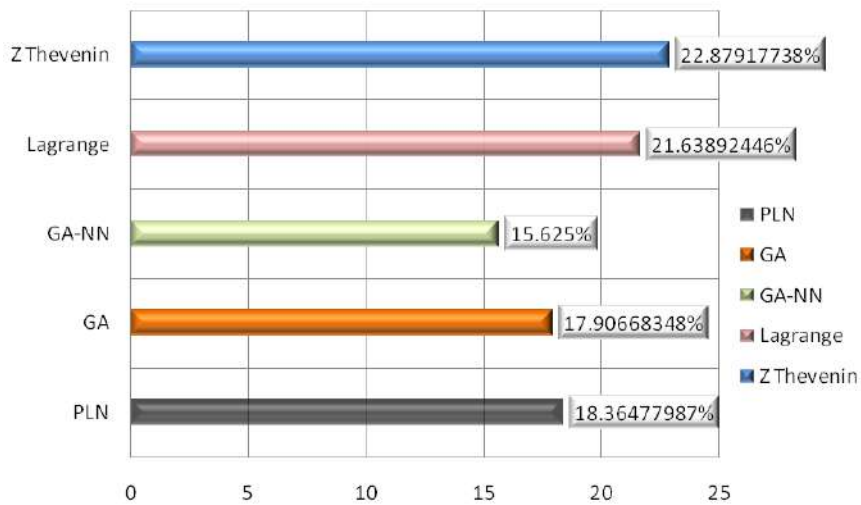
$$\text{Voltage Stability Reserve} = \frac{V_{max} - V_{base\ case}}{V_{base\ case}} \times 100\% \quad (85)$$

Dapat dilihat pada Tabel 40 bahwa strategi impedansi Thevenin mempunyai keamanan yang lebih baik. Margin stabilitas yang tersisa dari kondisi pembebanan awal ke kondisi tidak stabil adalah sekitar 76,29 %, diikuti oleh strategi Lagrange 70,17%, Merit Order 58,71%, GA 54,51%, dan NN-GA 46,55%.

**Tabel 40** Perbandingan *Power Stability Reserve*



**Tabel 41** Perbandingan *Voltage Stability Reserve*



Dapat dilihat dari Tabel 41 bahwa strategi impedansi Thevenin mempunyai margin stabilitas tegangan yang lebih besar. Margin ini sangat memengaruhi fenomena *voltage collapse*. Semakin besar margin ini, semakin jauh dari kondisi *voltage collapse*.

# BAB X

## STABILITAS *STEADY STATE* PADA SISTEM SULSELBAR

Untuk mengetahui hasil telaah batas stabilitas *steady state* sistem Sulawesi Selatan dan Barat (Sulselbar) digunakan program komputer, dalam hal ini program MATLAB. Dengan menggunakan program MATLAB, kita dapat dengan mudah melakukan telaah aliran daya pada sistem. Data aliran daya yang didapatkan digunakan untuk mereduksi matriks jaringan yang semula terdapat 44 bus ditambah dengan 13 data impedansi generator, kemudian menjadi 14 bus yaitu 13 bus generator dan 1 bus pusat beban dengan mengikuti langkah reduksi REI-Dimo<sup>[46]</sup>.

### 10.1. Load Flow Sistem 44 Bus

Berdasarkan data yang diambil dari PT. PLN (Persero), dilakukan telaah aliran daya dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 42 dan Tabel 43.

**Tabel 42** Line Flow dan Losses

Dari Bus	Ke Bus	Daya pada Bus dan Line			Rugi-Rugi Line	
		MW	MVAR	MVA	MW	MVAR
1		121.7	54.194	133.221		
	2	62.41	16.203	64.479	0.521	-1.232
	5	59.29	37.991	70.417	0.743	-1.508
2		-14.9	-3.8	15.377		
	1	-61.889	-17.435	64.298	0.521	-1.232
	3	28.044	0.474	28.048	0.202	-0.795
	6	18.944	13.161	23.067	0.115	-6.967
3		-11.1	-2.2	11.316		
	2	-27.843	-1.268	27.872	0.202	-0.795
	4	16.743	-0.932	16.769	0.043	-3.932
4		-16.7	-3	16.967		
	3	-16.7	-3	16.967	0.043	-3.932
5		-23.07	-48.918	54.085		
	1	-58.547	-39.499	70.625	0.743	-1.508

Dari Bus	Ke Bus	Daya pada Bus dan Line			Rugi-Rugi Line	
		MW	MVAR	MVA	MW	MVAR
	6	35.477	-9.419	36.706	0.093	0.066
6		-17.2	-4.6	17.804		
	2	-18.83	-20.128	27.563	0.115	-6.967
	5	-35.383	9.485	36.633	0.093	0.066
	7	-59.849	16.083	61.972	0.151	0.319
	8	-48.569	5.016	48.828	0.239	0.29
	9	145.431	-15.056	146.208	1.068	6.902
7		60	-15.763	62.036		
	6	60	-15.763	62.036	0.151	0.319
8		-25.3	-9	26.853		
	6	48.808	-4.727	49.037	0.239	0.29
	36	17.8	-8.279	19.631	0.039	-1.578
	37	-55.049	-39.181	67.569	0.237	0.228
	38	-124.45	36.23	129.616	5.295	27.037
	30	87.59	6.957	87.866	0.475	1.66
9		22.93	30.55	38.198		
	6	-144.363	21.958	146.024	1.068	6.902
	10	167.293	8.591	167.514	1.646	4.792
10		-9.4	-2.4	9.702		
	9	-165.647	-3.799	165.691	1.646	4.792
	11	156.247	1.399	156.253	3.021	6.342
11		-22.1	-8	23.503		
	10	-153.226	4.943	153.306	3.021	6.342
	12	32.514	-9.173	33.783	0	2.392
	14	46.268	5.684	46.616	0.126	-1.396
	15	52.344	-9.454	53.191	0.126	-0.979
12		0	20	20		
	11	-32.514	11.565	34.509	0	2.392
	13	31.276	8.803	32.491	0.176	0.303
	20	1.238	-0.369	1.292	0.003	-0.191
13		-31.1	-8.5	32.241		
	12	-31.1	-8.5	32.241	0.176	0.303
14		-40.78	-13.35	42.91		
	11	-46.142	-7.08	46.682	0.126	-1.396
	16	5.362	-6.27	8.25	0.014	-2.106
15		-14.1	-4.5	14.801		
	11	-52.218	8.475	52.901	0.126	-0.979
	16	38.118	-12.975	40.266	0.072	-1.172
16		-40.5	7.232	41.141		
	15	-38.046	11.803	39.835	0.072	-1.172
	14	-5.348	4.164	6.778	0.014	-2.106
	24	82.666	-4.071	82.766	0.264	0.616
	17	70.441	20.657	73.408	1.241	2.257
	18	22.923	-11.113	25.475	0	1.434

Dari Bus	Ke Bus	Daya pada Bus dan Line			Rugi-Rugi Line	
		MW	MVAR	MVA	MW	MVAR
	22	0	-0.008	0.008	0	0
	27	-173.137	-14.2	173.718	0.617	3.755
17		-69.2	-18.4	71.604		
	16	-69.2	-18.4	71.604	1.241	2.257
18		0	20	20		
	16	-22.923	12.548	26.133	0	1.434
	19	-18.495	1.246	18.537	0.105	0.058
	20	13.201	1.91	13.339	0.052	-0.03
	21	28.217	4.297	28.542	0.099	0.131
19		18.6	-1.188	18.638		
	18	18.6	-1.188	18.638	0.105	0.058
20		-17	-2.1	17.129		
	12	-1.235	0.178	1.248	0.003	-0.191
	18	-13.149	-1.94	13.291	0.052	-0.03
	21	-2.616	-0.338	2.638	0.001	-0.072
21		-25.5	-3.9	25.797		
	20	2.618	0.266	2.631	0.001	-0.072
	18	-28.118	-4.166	28.425	0.099	0.131
22		0	0	0		
	16	0	0.008	0.008	0	0
	23	0	-0.008	0.008	0	-0.008
23		0	0	0		
	22	0	0	0	0	-0.008
24		-37.7	-9.7	38.928		
	16	-82.402	4.687	82.535	0.264	0.616
	25	44.702	-14.387	46.96	0	4.899
25		0	20	20		
	24	-44.702	19.286	48.685	0	4.899
	26	44.702	0.714	44.708	0.402	0.714
26		-44.3	0	44.3		
	25	-44.3	0	44.3	0.402	0.714
27		-35.7	-8.4	36.675		
	16	173.754	17.955	174.68	0.617	3.755
	28	41.57	12.708	43.47	0.07	-0.092
	29	-181.687	-40.392	186.123	1.763	10.857
	30	-69.337	1.329	69.35	1.378	2.626
28		-41.5	-12.8	43.429		
	27	-41.5	-12.8	43.429	0.07	-0.092
29		-15.2	123.158	124.093		
	27	183.45	51.25	190.474	1.763	10.857
	31	-164.174	66.259	177.041	2.757	6.368
	32	-34.476	5.65	34.936	0.208	-7
30		-16.4	-4	16.881		
	27	70.716	1.297	70.728	1.378	2.626

Dari Bus	Ke Bus	Daya pada Bus dan Line			Rugi-Rugi Line	
		MW	MVAR	MVA	MW	MVAR
	8	-87.116	-5.297	87.277	0.475	1.66
31		221.1	-65.726	230.662		
	29	166.931	-59.89	177.35	2.757	6.368
	32	54.169	-5.836	54.482	0.144	-0.271
32		-20	-4.3	20.457		
	29	34.683	-12.65	36.918	0.208	-7
	31	-54.025	5.565	54.311	0.144	-0.271
	33	-0.658	2.785	2.861	0.003	-1.359
33		-28.8	-7.3	29.711		
	32	0.661	-4.144	4.196	0.003	-1.359
	34	-7.496	-6.056	9.637	0.012	-3.473
	35	-21.965	2.9	22.156	0.079	-3.221
34		-5.2	5.037	7.24		
	33	7.508	2.583	7.94	0.012	-3.473
	35	-12.708	2.454	12.943	0.011	-4.449
35		-28.8	-8.2	29.945		
	34	12.719	-6.903	14.471	0.011	-4.449
	33	22.044	-6.121	22.878	0.079	-3.221
	36	-63.563	4.824	63.746	0.937	1.72
36		-13.1	-4.2	13.757		
	35	64.5	-3.104	64.575	0.937	1.72
	8	-17.761	6.702	18.984	0.039	-1.578
	37	-59.839	-7.797	60.345	0.376	0.605
37		115.501	47.812	125.005		
	36	60.214	8.403	60.798	0.376	0.605
	8	55.286	39.409	67.895	0.237	0.228
38		4.3	31.781	32.071		
	8	129.745	-9.193	130.07	5.295	27.037
	39	-125.445	40.975	131.967	3.42	11.181
39		-35.9	28.347	45.743		
	38	128.865	-29.793	132.264	3.42	11.181
	40	-164.765	58.142	174.722	0	26.306
40		0	0	0		
	39	164.765	-31.836	167.812	0	26.306
	42	-164.765	31.836	167.812	7.789	57.521
41		183.8	25.466	185.556		
	42	183.8	25.466	185.556	0	2.238
42		0	0	0		
	40	172.554	25.685	174.455	7.789	57.521
	41	-183.8	-23.228	185.262	0	2.238
	43	11.246	-2.457	11.512	0.013	-0.03
43		-4.55	-0.2	4.554		
	42	-11.234	2.428	11.493	0.013	-0.03
	44	6.684	-2.628	7.182	0.004	-2.628

Dari Bus	Ke Bus	Daya pada Bus dan Line			Rugi-Rugi Line	
		MW	MVAR	MVA	MW	MVAR
44		-6.68	0	6.68		
	43	-6.68	0	6.68	0.004	-2.628
<b>Total loss</b>					36.151	139.133

Tabel 42 menunjukkan hasil aliran daya sistem Sulselbar yang menunjukkan besarnya daya yang disalurkan dan besarnya daya yang hilang pada masing-masing saluran transmisi.

**Tabel 43** Power Flow Jaringan 44 Bus

No. Bus	Vm	Sudut Tegangan	Beban		Generator		Injected MVAR
			MW	MVAR	MW	MVAR	
1	1.03	-0.017	4.3	0.2	126	54.394	0
2	1.014	-1.505	14.9	3.8	0	0	0
3	1.006	-2.975	11.1	2.2	0	0	0
4	1.003	-3.489	16.7	3	0	0	0
5	1	-1.491	23.5	7	0.43	-41.918	0
6	1	-2.034	17.2	4.6	0	0	0
7	1	-1.513	0	0	60	-15.763	0
8	1.003	-1.005	25.3	9	0	0	0
9	1	-5.388	0	0	22.93	30.55	0
10	0.989	-7.283	9.4	2.4	0	0	0
11	0.971	-11.301	22.1	8	0	0	0
12	0.991	-15.127	0	-20	0	0	0
13	0.984	-15.594	31.1	8.5	0	0	0
14	0.967	-11.833	40.78	13.35	0	0	0
15	0.97	-11.805	14.1	4.5	0	0	0
16	0.97	-12.188	48.5	15.5	8	22.732	0
17	0.946	-13.659	69.2	18.4	0	0	0
18	0.995	-15.019	0	-20	0	0	0
19	1	-14.403	0.7	0	19.3	-1.188	0
20	0.99	-15.396	17	2.1	0	0	0
21	0.991	-15.351	25.5	3.9	0	0	0
22	0.97	-12.188	0	0	0	0	0
23	0.97	-12.188	0	0	0	0	0
24	0.967	-12.853	37.7	9.7	0	0	0
25	1.003	-18.349	0	-20	0	0	0
26	0.994	-19.295	44.3	0	0	0	0
27	0.976	-10.823	35.7	8.4	0	0	0
28	0.971	-11.33	41.5	12.8	0	0	0
29	1	-7.387	23.2	5.3	8	128.458	0
30	0.995	-3.106	16.4	4	0	0	0

No. Bus	Vm	Sudut Tegangan	Beban		Generator		Injected MVAR
			MW	MVAR	MW	MVAR	
31	1	-4.883	0	0	221.1	-65.726	0
32	0.999	-5.93	20	4.3	0	0	0
33	0.996	-5.849	28.8	7.3	0	0	0
34	1	-5.646	14.9	6.9	9.7	11.937	0
35	0.997	-5.097	28.8	8.2	0	0	0
36	1.009	-2.071	13.1	4.2	0	0	0
37	1.02	0	25	9.2	140.501	57.012	0
38	1	13.254	8.8	2.1	13.1	33.881	0
39	1	18.787	44.6	7.3	8.7	35.647	0
40	0.96	27.288	0	0	0	0	0
41	1	47.545	0	0	183.8	25.466	0
42	0.998	46.86	0	0	0	0	0
43	0.998	46.641	4.55	0.2	0	0	0
44	0.998	46.378	6.68	0	0	0	0
Total			785.41	136.35	821.561	275.481	0

Tabel 43 menunjukkan nilai tegangan, beban, dan besarnya pembangkitan pada masing-masing bus.

## 10.2. Perhitungan Rei-Dimo

### 10.2.1. Perhitungan Admitansi Konstan

Untuk membentuk jalur informasi baru, jaringan dilengkapi dengan informasi impedansi generator yang diperoleh dari data PT PLN (Persero). Berdasarkan hasil yang diperoleh selama proses aliran daya, seluruh bus beban kemudian dihubungkan ke bus netral fiktif dengan admitansi konstan menggunakan persamaan (66) dan menghitung aliran dari bus beban ke bus netral fiktif dengan menggunakan persamaan (67).

**Tabel 44** Admitansi Konstan dan Arus Beban

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	G (pu)	B (pu)	Arus Beban (pu)
1	1.03	-0.017	0.02	-0.001	0.021
2	1.014	-1.505	0.072	-0.018	0.073
3	1.006	-2.975	0.055	-0.011	0.055
4	1.003	-3.489	0.083	-0.015	0.083
5	1	-1.491	0.117	-0.035	0.117
6	1	-2.034	0.086	-0.023	0.086
7	1	-1.513	0	0	0
8	1.003	-1.005	0.126	-0.045	0.126

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	G (pu)	B (pu)	Arus Beban (pu)
9	1	-5.388	0	0	0
10	0.989	-7.283	0.048	-0.012	0.048
11	0.971	-11.301	0.117	-0.042	0.114
12	0.991	-15.127	0	0.102	0
13	0.984	-15.594	0.161	-0.044	0.158
14	0.967	-11.833	0.218	-0.071	0.211
15	0.97	-11.805	0.075	-0.024	0.073
16	0.97	-12.188	0.258	-0.082	0.25
17	0.946	-13.659	0.387	-0.103	0.366
18	0.995	-15.019	0	0.101	0
19	1	-14.403	0.003	0	0.003
20	0.99	-15.396	0.087	-0.011	0.086
21	0.991	-15.351	0.13	-0.02	0.129
22	0.97	-12.188	0	0	0
23	0.97	-12.188	0	0	0
24	0.967	-12.853	0.201	-0.052	0.195
25	1.003	-18.349	0	0.099	0
26	0.994	-19.295	0.224	0	0.223
27	0.976	-10.823	0.188	-0.044	0.183
28	0.971	-11.33	0.22	-0.068	0.214
29	1	-7.387	0.116	-0.026	0.116
30	0.995	-3.106	0.083	-0.02	0.082
31	1	-4.883	0	0	0
32	0.999	-5.93	0.1	-0.022	0.1
33	0.996	-5.849	0.145	-0.037	0.145
34	1	-5.646	0.074	-0.035	0.074
35	0.997	-5.097	0.145	-0.041	0.144
36	1.009	-2.071	0.064	-0.021	0.065
37	1.02	0	0.12	-0.044	0.123
38	1	13.254	0.044	-0.011	0.044
39	1	18.787	0.223	-0.036	0.223
40	0.96	27.288	0	0	0
41	1	47.545	0	0	0
42	0.998	46.86	0	0	0
43	0.998	46.641	0.023	-0.001	0.023
44	0.998	46.378	0.034	0	0.033
Total					3.986

Informasi hasil perhitungan menunjukkan bahwa arus yang mengalir dari bus beban menuju bus netral fiktif adalah 3,986 (pu). Kemudian menghitung besar arus yang mengalir dari bus netral fiktif ke bus pusat beban dengan menggunakan hukum *kirchoff*.

Nilai impedansi  $Z_{lc}$  dari bus netral fiktif menuju bus pusat beban ditentukan dengan menggunakan persamaan (III.5), dan diperoleh nilai  $Z_{lc}$  sebesar  $0.2398+j0.0416$ . adapun perhitungan tegangan pada bus pusat beban menggunakan persamaan (III.6), dan diperoleh tegangan ( $V_{lc}$ ) sebesar  $0,9985$  (pu) dengan sudut tegangan sebesar  $0,0012^\circ$ .

### 10.2.2. Reduksi REI-Dimo

Penomoran bus dari 1 hingga 59 diurutkan kembali sebelum melanjutkan proses reduksi. Bus 1 hingga bus 13 diisi dengan bus generator, bus 14 diisi dengan bus pusat beban, bus 15 diisi dengan bus netral fiktif, bus 16 hingga bus 46 diisi dengan bus beban, dan bus 47 hingga bus 59 diisi dengan bus impedansi generator, sehingga nantinya akan terbentuk matriks  $59 \times 59$ .

Matriks  $59 \times 59$  direduksi menjadi matriks  $14 \times 14$  dengan menggunakan eliminasi *Gauss-Seidel*, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 45 berikut.

**Tabel 45** Matriks Hasil Reduksi

Bus	1	5	7	9
1	-5.1050+18.2318i	2.7361-9.8318i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
5	2.7361-9.8318i	-6.1563+21.8236i	1.3666-4.9101i	0.0000+0.0000i
7	0.0000+0.0000i	1.3666-4.9101i	-3.7153+13.3128i	2.3487-8.4165i
9	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	2.3487-8.4165i	-2.3487+8.4064i
16	2.3488-8.4165i	0.0005-0.0001i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
19	0.0000+0.0000i	1.9633-7.0529i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
29	0.0000+0.0000i	0.0003+0.0001i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
31	0.0016+0.0001i	0.0074-0.0039i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
34	0.0000+0.0000i	0.0002+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
37	0.0000+0.0000i	0.0003+0.0001i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
38	0.0149-0.0026i	0.0618-0.0514i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
39	0.0004+0.0001i	0.0020-0.0007i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
41	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
45 (lc)	0.0032+0.0013i	0.0180-0.0025i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i

Lanjutan

Bus	16	19	29	31
1	2.3488-8.4165i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0016+0.0001i
5	0.0005-0.0001i	1.9633-7.0529i	0.0003+0.0001i	0.0074-0.0039i
7	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
9	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
16	-7.7119+27.1985i	5.2049-18.6521i	0.0006+0.0001i	0.0132-0.0098i
19	5.2049-18.6521i	-21.4640+83.8021i	9.1452-32.8389i	3.5884-12.8943i
29	0.0006+0.0001i	9.1452-32.8389i	-9.2590+32.8687i	0.0090-0.0016i
31	0.0132-0.0098i	3.5884-12.8943i	0.0090-0.0016i	-5.0445+15.9569i
34	0.0004-0.0000i	1.5591-12.3887i	0.0002+0.0001i	0.0052-0.0027i

37	0.0006+0.0001i	0.0000+0.0000i	0.0003+0.0002i	0.0095-0.0027i
38	0.1052-0.1191i	0.0026-0.0003i	0.0818-0.0328i	0.8676-2.3057i
39	0.0036-0.0020i	0.0001+0.0000i	0.0023-0.0001i	0.0462-0.1111i
41	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
45 (lc)	0.0344-0.0104i	0.0005+0.0002i	0.0196+0.0034i	0.4838-0.7844i

Lanjutan

Bus	34	37	38	39
1	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0149-0.0026i	0.0004+0.0001i
5	0.0002+0.0000i	0.0003+0.0001i	0.0618-0.0514i	0.0020-0.0007i
7	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
9	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
16	0.0004-0.0000i	0.0006+0.0001i	0.1052-0.1191i	0.0036-0.0020i
19	1.5591-12.3887i	0.0000+0.0000i	0.0026-0.0003i	0.0001+0.0000i
29	0.0002+0.0001i	0.0003+0.0002i	0.0818-0.0328i	0.0023-0.0001i
31	0.0052-0.0027i	0.0095-0.0027i	0.8676-2.3057i	0.0462-0.1111i
34	-8.4584+35.5757i	6.8356-23.1517i	0.0437-0.0364i	0.0014-0.0005i
37	6.8356-23.1517i	-9.9422+33.8874i	3.0720-10.7484i	0.0025-0.0003i
38	0.0437-0.0364i	3.0720-10.7484i	-14.6224+44.0558i	0.2988-3.0748i
39	0.0014-0.0005i	0.0025-0.0003i	0.2988-3.0748i	-7.4876+16.1819i
41	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i	6.9857-12.8259i
45 (lc)	0.0127-0.0018i	0.0215+0.0015i	10.0753-27.7834i	0.1455-0.1722i

Lanjutan

Bus	41	45 (load center)
1	0.0000+0.0000i	0.0032+0.0013i
5	0.0000+0.0000i	0.0180-0.0025i
7	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
9	0.0000+0.0000i	0.0000+0.0000i
16	0.0000+0.0000i	0.0344-0.0104i
19	0.0000+0.0000i	0.0005+0.0002i
29	0.0000+0.0000i	0.0196+0.0034i
31	0.0000+0.0000i	0.4838-0.7844i
34	0.0000+0.0000i	0.0127-0.0018i
37	0.0000+0.0000i	0.0215+0.0015i
38	0.0000+0.0000i	10.0753-27.7834i
39	6.9857-12.8259i	0.1455-0.1722i
41	-6.9857+12.8258i	0.0000+0.0000i
45 (lc)	0.0000+0.0000i	-10.8060+28.7072i

Admitansi konstan kemudian diubah menjadi impedansi untuk digunakan sebagai *input* nilai impedansi ekuivalen untuk melakukan aliran daya dari 14 bus yang telah direduksi. Hasil aliran daya dari 14 bus ditunjukkan pada Tabel 46.

**Tabel 46** Power Flow Jaringan 14 Bus

No. Bus	Vm	Sudut Tegangan	Beban		Generator		Injected MVAR
			MW	MVAR	MW	MVAR	
1	1.03	11.875	0	0	126	142.663	0
2	1	11.612	0	0	0.43	-60.144	0
3	1	16.395	0	0	60	-12.83	0
4	1	17.174	0	0	22.93	-6.231	0
5	0.97	9.499	0	0	8	-227.131	0
6	1	7.54	0	0	19.3	160.782	0
7	1	7.581	0	0	8	-7.862	0
8	1	7.293	0	0	221.1	-39.122	0
9	1	2.847	0	0	9.7	-124.753	0
10	1.02	0	0	0	242.595	132.804	0
11	1	-11.115	0	0	13.1	557.675	0
12	1	4.732	0	0	8.7	107.339	0
13	1	8.764	0	0	183.8	-91.877	0
14	0.915	-17.532	785.41	136.35	0	0	0

**10.2.3. Steady State Stability Limit (SSSL)**

Penelaahan indeks stabilitas menggunakan persamaan (64) yang dikembangkan oleh Paul Dimo. Untuk menampilkan hasil yang diperoleh, maka dibuat suatu sebuah program dibuat menggunakan GUI MATLAB untuk menampilkan hasil yang diperoleh, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 66.



**Gambar 66** Tampilan GUI MATLAB dengan Beban Aktual

Gambar 66 adalah tampilan aplikasi yang dibuat dengan mengambil contoh beban aktual yang terjadi ketika pengintegrasian informasi dengan menjadikan bus 37 (bus sengkang) sebagai *slack bus*. Nilai indeks stabilitas diperoleh dengan menggunakan persamaan berikut.

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos(\delta_m + \gamma_m)} - 2 \left( \sum_m Y_m \cos \gamma_m + Y_{load} + Y^V \right) V$$

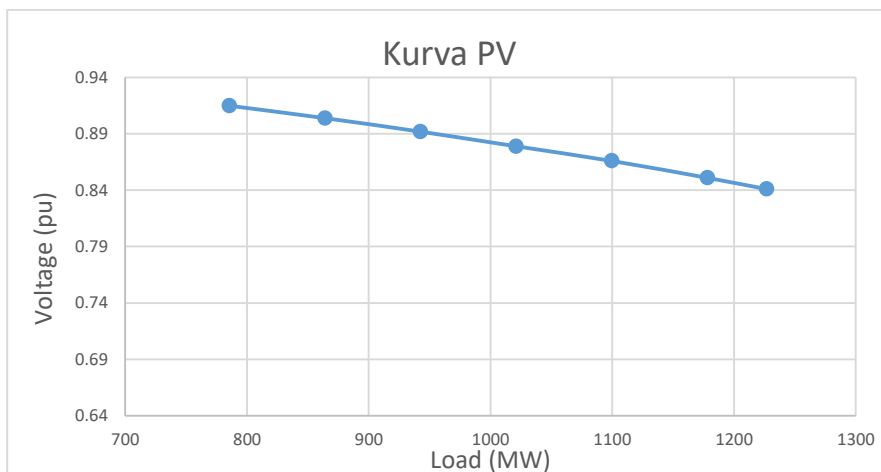
a. Bakaru sebagai *Slack Bus*

Berdasarkan hasil reduksi di atas, di mana Bakaru yang ditetapkan sebagai *slack bus*, diperoleh indeks stabilitas sistem Sulselbar sebesar -21,4305. Jika nilai total beban terus meningkat dengan persentase nilai daya aktif dan daya reaktif yang sesuai, maka hasil yang diperoleh terlihat pada Tabel 47, dan membentuk kurva PV yang ditunjukkan pada Gambar 67, kurva sudut tegangan ditunjukkan pada Gambar 68, dan kurva indeks stabilitas ditunjukkan pada Gambar 69.

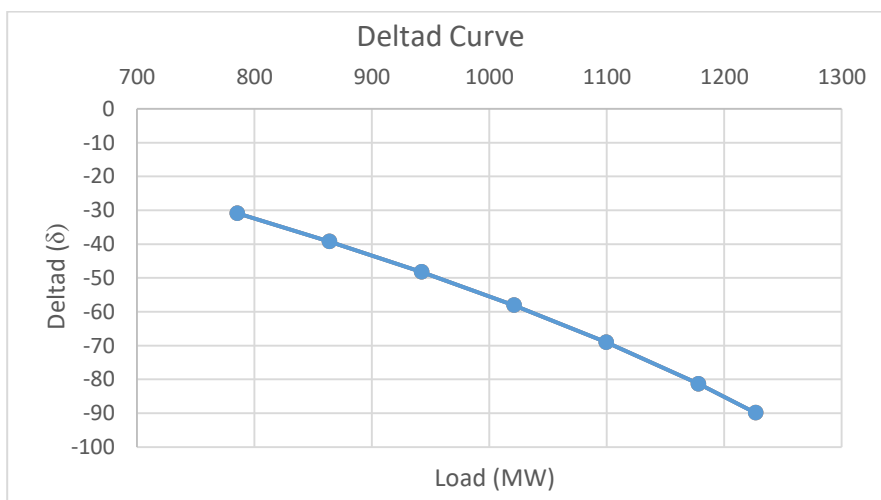
**Tabel 47** Informasi Pemeriksaan REI-Dimo dengan Bakaru sebagai *Slack Bus*

% kenaikan beban	beban		indeks	tegangan beban	sudut tegangan
	P	Q			
0	785.41	136.35	-21.44	0.915	-30.89
10	863.95	149.99	-20.71	0.904	-39.24
20	942.49	163.62	-19.92	0.892	-48.26
30	1021.03	177.26	-19.05	0.879	-58.10
40	1099.57	190.89	-18.08	0.866	-68.99
50	1178.12	204.53	-16.96	0.851	-81.29
56.2	1226.81	212.98	-14.77	0.841	-89.86

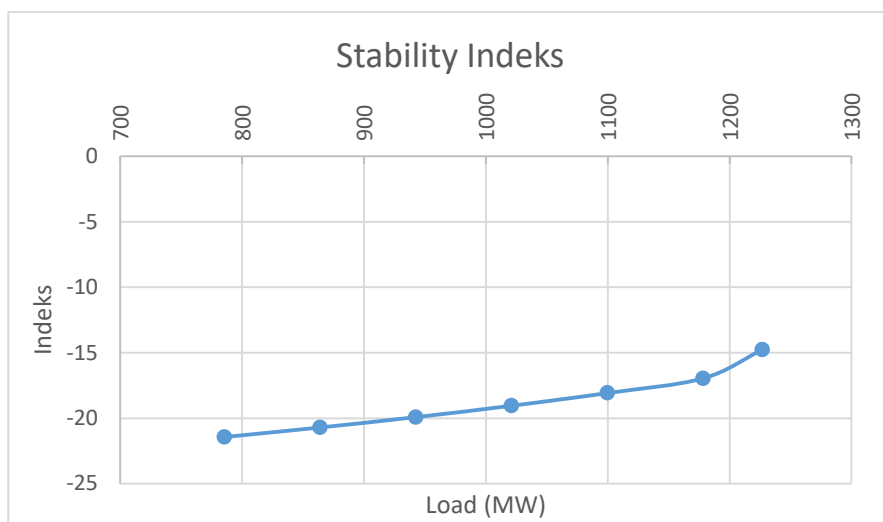
Berdasarkan informasi pemeriksaan yang diperoleh, dapat dilihat bahwa titik kritis sistem berada pada pembebanan P sebesar 1226,81 MW dan Q sebesar 212,98 MVAR.



**Gambar 67** Kurva PV dengan Bakaru sebagai *Slack Bus*



**Gambar 68** Kurva Sudut Tegangan dengan Bakaru sebagai *Slack Bus*



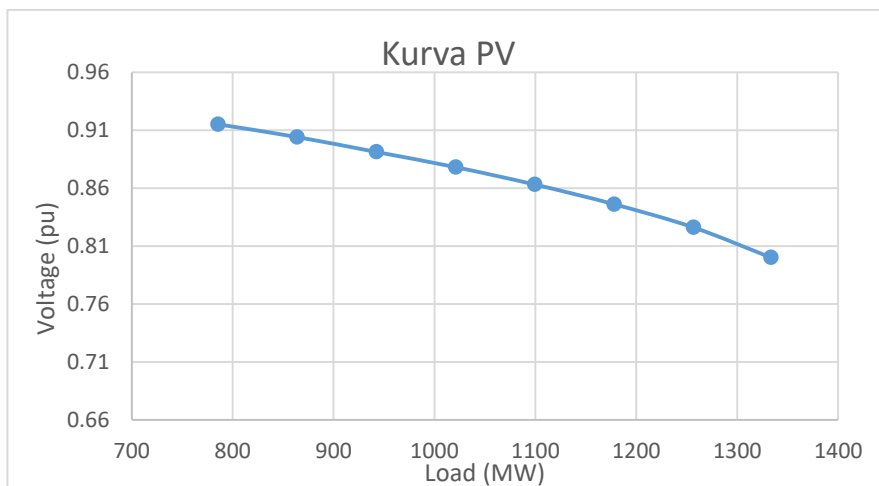
**Gambar 69** Kurva Indeks Stabilitas dengan Bakaru sebagai *Slack Bus*

b. PGAYA sebagai *Slack Bus*

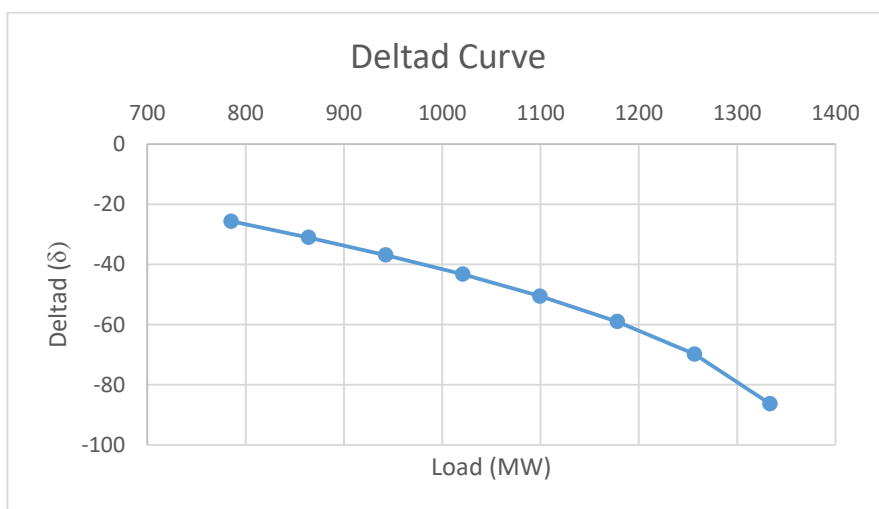
Bus PGAYA digunakan sebagai *slack bus* dan diperoleh indeks stabilitas sistem Sulselbar sebesar -21,4305. Jika nilai total beban terus meningkat dengan persentase nilai daya aktif dan daya reaktif yang sesuai, hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 48, dan membentuk kurva PV yang ditunjukkan pada Gambar 70, kurva sudut tegangan ditunjukkan pada Gambar 71, dan kurva indeks stabilitas ditunjukkan pada Gambar 72.

**Tabel 48** Informasi Pemeriksaan REI-Dimo dengan PGAYA sebagai *Slack Bus*

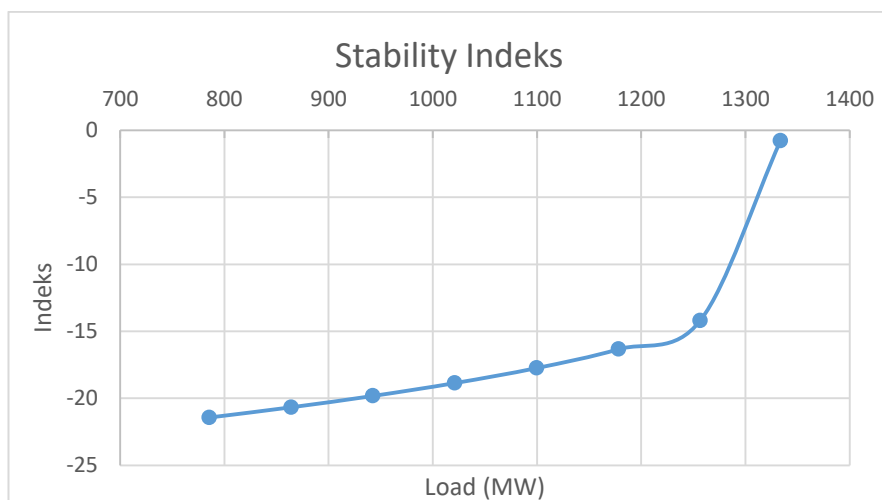
% kenaikan beban	beban		indeks	tegangan beban	sudut tegangan
	P	Q			
0	785.41	136.35	-21.4305	0.915	-25.6617
10	863.95	149.99	-20.6673	0.904	-31.0477
20	942.49	163.62	-19.8207	0.8911	-36.8778
30	1021.03	177.26	-18.8629	0.878	-43.2963
40	1099.57	190.89	-17.7419	0.863	-50.5384
50	1178.12	204.53	-16.3348	0.846	-59.0396
60	1256.66	218.16	-14.1910	0.826	-69.7963
69.8	1333.63	231.52	-0.7736	0.8	-86.3268



**Gambar 70** Kurva PV dengan PGAYA sebagai *Slack Bus*



**Gambar 71** Kurva Sudut Tegangan dengan PGAYA sebagai *Slack Bus*



**Gambar 72** Kurva Indeks Stabilitas dengan PGAYA sebagai *Slack Bus*

Informasi pemeriksaan yang diperoleh menunjukkan bahwa titik kritis sistem berada pada pembebanan P sebesar 1333,63 MW dan Q sebesar 231,52 MVAR.

c. Sengkan sebagai *Slack Bus*

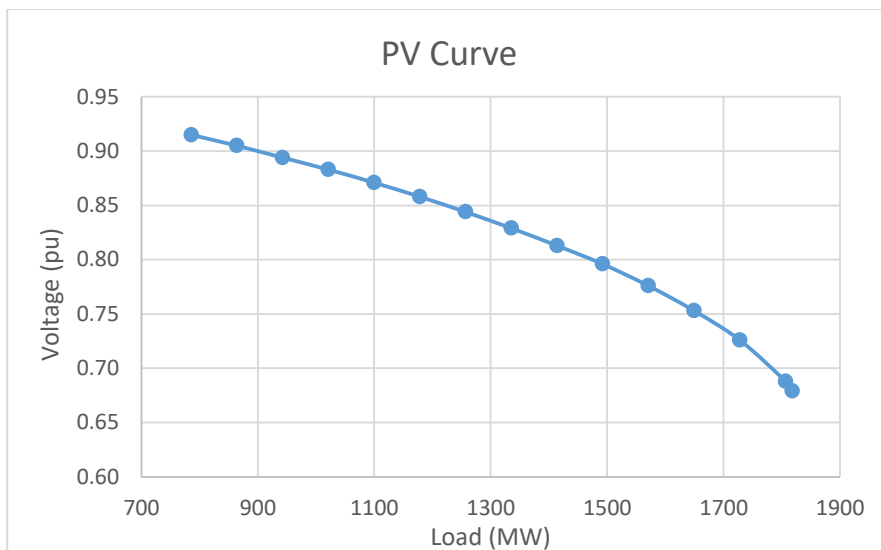
Bus sengkan digunakan sebagai *slack bus* dan diperoleh indeks stabilitas sistem Sulsebar sebesar -21,4523. Jika nilai total beban terus meningkat dengan persentase nilai daya aktif dan daya reaktif yang sesuai, maka hasil yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 49, dan membentuk kurva PV yang terlihat pada Gambar 73, kurva sudut tegangan ditunjukkan pada Gambar 74, dan indeks stabilitas yang ditunjukkan pada Gambar 75.

**Tabel 49** Informasi Pemeriksaan REI-Dimo dengan Sengkan sebagai *Slack Bus*

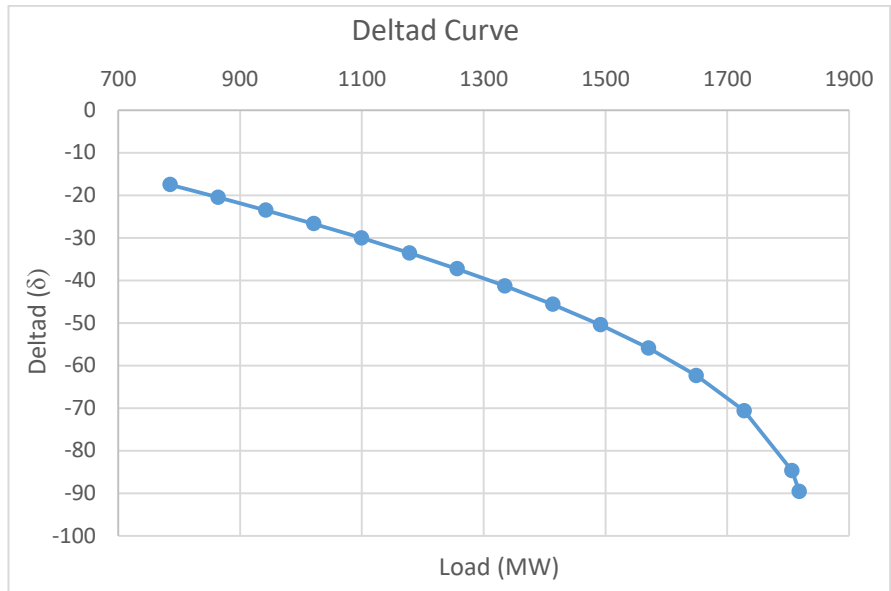
% kenaikan beban	beban		indeks	tegangan beban	sudut tegangan
	P	Q			
0	785.41	136.35	-21.4523	0.915	-17.532
10	863.95	149.99	-20.7926	0.905	-20.4711
20	942.49	163.62	-20.0923	0.894	-23.5236
30	1021.03	177.26	-19.346	0.883	-26.707

% kenaikan beban	beban		indeks	tegangan beban	sudut tegangan
	P	Q			
40	1099.57	190.89	-18.5476	0.871	-30.0434
50	1178.12	204.53	-17.6885	0.858	-33.5613
60	1256.66	218.16	-16.7584	0.844	-37.29
70	1335.20	231.80	-15.7427	0.829	-41.304
80	1413.74	245.43	-14.6213	0.813	-45.6543
90	1492.28	259.07	-13.3639	0.796	-50.4609
100	1570.82	272.70	-11.922	0.776	-55.9099
110	1649.36	286.34	-10.2063	0.753	-62.3536
120	1727.90	299.97	-8.0085	0.726	-70.6346
130	1806.44	313.61	-4.2157	0.688	-84.7277
131.5	1818.22	315.65	-0.1775	0.679	-89.5646

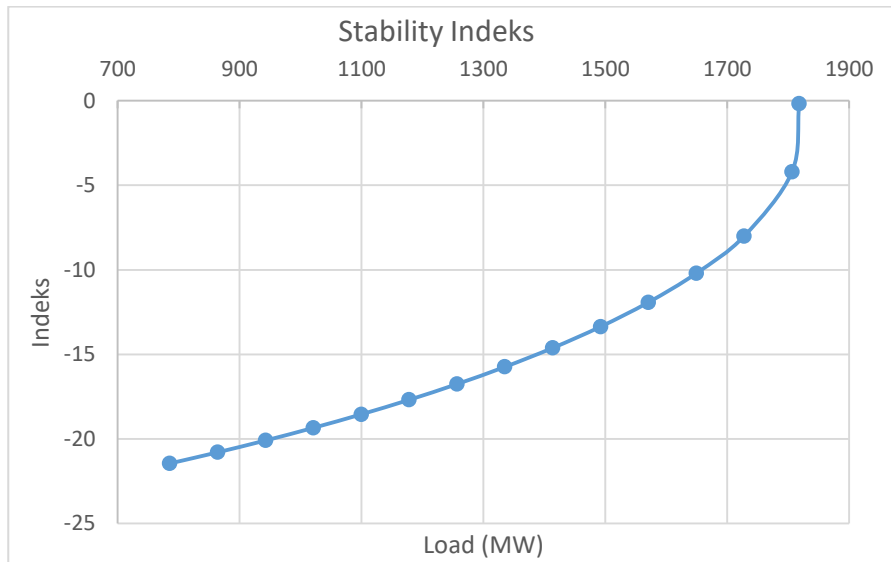
Berdasarkan informasi pemeriksaan yang diperoleh, dapat dilihat bahwa titik kritis sistem berada pada pembebanan P sebesar 1818,22 MW dan Q sebesar 315,65 MVAR.



**Gambar 73** Kurva PV dengan Senggang sebagai *Slack Bus*



**Gambar 74** Kurva Sudut Tegangan dengan Senggang sebagai *Slack Bus*



**Gambar 75** Kurva Indeks Stabilitas dengan Senggang sebagai *Slack Bus*

Terlihat dari informasi pada Tabel 47, Tabel 48, dan Tabel 49 bahwa pemilihan *slack bus* sangat berpengaruh terhadap stabilitas sistem tenaga listrik. Pemilihan *slack bus* yang tepat akan berpengaruh terhadap kelangsungan pelayanan kelistrikan.

Untuk kasus bus Bakaru yang digunakan sebagai *slack bus*, terlihat kondisi titik kritis terjadi pada beban P sebesar 1226,81 MW dan Q sebesar 212,98 MVAR. Ini menunjukkan bahwa masih ada kisaran sekitar 56,2% untuk meningkatkan beban dari beban awal. Adapun untuk kasus bus PGAYA yang digunakan sebagai *slack bus* diperoleh titik kritis pada pembebanan P sebesar 1333,63 MW dan Q sebesar 231,52 MVAR. Ini menunjukkan bahwa masih ada sekitar 69,8% untuk meningkatkan beban dari beban aktual. Hal yang sama terlihat jika *busbar* sengkang digunakan sebagai *slack bus*. Titik kritis terjadi pada kondisi beban P sebesar 1818,22 MW dan Q sebesar 315,65 MVAR. Kisaran peningkatan beban sebesar 131,5% dari beban aktual.

# BAB XI

## INFERENSI

Dari uraian yang telah dipaparkan pada bab sebelumnya, maka dapat diperoleh inferensi sebagai berikut. Pertama, karakteristik beban memiliki pengaruh besar dalam telaah stabilitas *steady state*. Hal ini terlihat dari perubahan pembebanan maksimum karena nilai koefisien  $\rho$  dan  $q$  berubah. Karakteristik beban daya konstan cenderung mengurangi pembebanan maksimum sistem. Situasi ini menunjukkan bahwa karakteristik beban daya konstan berperan dalam ketidakstabilan sistem atau *voltage collapse*. Kedua, posisi rasio *tap changer* transformator berpengaruh besar terhadap batas pembebanan maksimum. Dapat dilihat dari simulasi bahwa apabila nilai rasio *tap changer transformator* dinaikkan, nilai daya maksimum pada sisi beban akan menurun dan nilai tegangan kritis akan meningkat.

Ketiga, dalam penelaahan batas kestabilan *steady state* menggunakan *neural network*, hasil estimasi menunjukkan bahwa strategi Neural Network dapat digunakan untuk menentukan SSSL dilihat dari tingkat akurasi. ANN mempunyai beberapa keunggulan, yaitu bersifat adaptif, tingkat komputasi yang tinggi, pemrosesan terdistribusi paralel, dan toleran terhadap kesalahan, sehingga ANN dapat digunakan sebagai alternatif untuk aplikasi *real time monitoring*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbandingan hasil REI-Dimo dan hasil ANN mempunyai nilai eror kurang dari 0,5%, yang berarti ANN dapat digunakan sebagai strategi untuk penelaahan *steady state stability* pada sistem tenaga.

Keempat, dalam telaah batas stabilitas *steady state* menggunakan *Extreme Learning Machine* (ELM), estimasi yang dihasilkan mempunyai tingkat kesalahan yang rendah. Ini menunjukkan bahwa ELM dapat digunakan sebagai strategi penentuan limit SSSL. Dapat dilihat bahwa semua kesalahan dari nilai keluaran yang diberikan memiliki nilai kurang dari 0,23%. Nilai kesalahan tersebut masih dapat diterima sehingga dapat

dikatakan bahwa strategi ELM dapat digunakan secara akurat untuk telaah stabilitas *steady state*. Perbandingan nilai kesalahan menunjukkan bahwa hasil ELM lebih akurat daripada hasil ANN. Nilai eror maksimum ELM adalah 0,06%, 0,17%, 0,1%, 0,23%, dan 0,03%. Sementara nilai eror ANN adalah 0,45%, 0,32%, 0,24%, 0,19%, dan 0,57%. Dari hasil tersebut terlihat bahwa tingkat kesalahan ELM lebih rendah daripada ANN.

Kelima, dalam telaah *steady state* dengan menggunakan ELM berbasis *Modal Analysis*, estimasi yang dihasilkan dari strategi ELM menunjukkan bahwa strategi tersebut mampu memprediksi keadaan stabilitas tegangan pada sistem tenaga listrik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *Modal Analysis* dan ELM mempunyai perbandingan tingkat kesalahan dari nilai keluaran kurang dari 0,07, dan nilai tersebut dapat diterima. Ini menunjukkan bahwa ELM sangat baik digunakan untuk telaah stabilitas *steady state* dan sangat cocok diterapkan pada *online steady state monitoring* pada sistem tenaga.

Keenam, strategi yang diusulkan dalam telaah *active power rescheduling* untuk meningkatkan indeks stabilitas *steady state* ternyata mampu memperbaiki nilai cadangan stabilitas daya, di mana margin stabilitas sisa dari kondisi beban awal ke kondisi tidak stabil adalah sekitar 76,29 %, diikuti oleh strategi Lagrange sebesar 70,17%, *Merit Order* 58,71%, GA 54,51%, dan NN-GA sebesar 46,55%. Selain itu, strategi yang diusulkan juga mampu meningkatkan cadangan stabilitas tegangan. Margin ini sangat memengaruhi fenomena *voltage collapse*. Semakin besar margin ini, semakin jauh kondisi *voltage collapse*.

Ketujuh, dari hasil simulasi REI-Dimo yang dilakukan, peningkatan beban akan menyebabkan penurunan tegangan dan sudut tegangan pada bus pusat beban, dan indeks stabilitas menuju nol. Sementara untuk kondisi sistem Sulselbar, bus sengkang paling baik digunakan sebagai *slack bus* karena memiliki rentang titik kritis paling tinggi, yaitu nilai beban P sebesar 1818,22 MW dan Q sebesar 315,65 MVAR. Hal ini berarti jaringan masih mampu mengalirkan daya sebesar 131,5% hingga titik kritis beban yang ada, yaitu P sebesar 785,41 MW dan Q sebesar 136,35 MVAR. Dan terakhir, rancangan sistem yang dibangun pada GUI MATLAB dengan memasukkan nilai SSSL akan membantu operator ketika memantau sistem Sulselbar.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad, *Power System Control And Stability*, Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1982
- [2] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill Inc, USA, 1994
- [3] T.J.E. Miller, *Reactive Power Control in Electric System*, Jhon Wiley & Sons, USA, 1982
- [4] Hadi Saadat, *Power System*, McGraw-Hill Inc, USA, 1999
- [5] Thierry Van Cutsem and Vournas Costas, *Voltage Stability of Electric Power System*, Kluwer Academic Publisher, Massachusetts USA, 1998
- [6] Edward Wilson Kimbark, *Power System Stability*, Jhon Wiley & Sons, USA, 1948
- [7] Savu C. Savulescu, *Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Center*, IEEE Press, Wiley, 2009
- [8] M.H. Haque, *A Fast Method for Determining The Voltage Stability Limit of A Power System*, Electric Power System Research 32, 1999, pp.35–43
- [9] Prabha Kundur, Jhon Paserba, Venkat Ajjarapu, Goran Andersson, Claudio Canizares, *Definition And Classification of Power System Stability*, IEEE Transactions on Power System, Vol.19, No.2, May, 2004, pp.1387–1401
- [10] Federico Milano and Kailash Srivastava, *Dynamic REI Equivalent for Short Circuit and Transient Stability Analyses*, Electric Power System Research 79, 2009, pp.878–887
- [11] S. Kamalasadana, D. Thukaram, A.K. Srivastava, *A New Intelligent Algorithm for Online Voltage Stability Assessment and Monitoring*, Electric Power System Research 31, 2009, pp.100–110
- [12] M.A. Tomim, J.R. Marti and L. Wang, *Parallel Solution of Large System Network Using The Multi Area Thevenin Equivalent*

- (MATE) Algorithm, Electric Power System Research 31, 2009, pp.497–503
- [13] J.F. Dopazo, G. Irisarri, A.M. Sasson, *Real-Time External System Equivalent for On-Line Contingency Analysis*, IEEE Transaction on PAS, Vol.PAS-98, Nov.,1979, pp.2153–2167
- [14] K. Visakha, D. Thukaram, Lawrence Jenkins, *An Approach for Real Power Scheduling to Improve System Stability Margins Under Normal and Network Contingencies*, Electric Power System Research 71, 2004, pp.109–117
- [15] Savu C. Savulescu, *Equivalent for Security Analysis of Power System*, IEEE Transaction on PAS, Vol.PAS-100, May,1981, pp.2672–2681
- [16] K.L. Lo, L.J. Peng, J.F. Macqueen, *Extended Ward Equivalent of External System for On-Line Security Analysis*, IEE 2<sup>nd</sup> Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, December, 1993
- [17] R.S. Tare and P.R. Bijwe, *A New Index for Voltage Stability Monitoring and Enhancement*, Electrical Power & Energy Systems, Vol.20,No.5, 1998, pp-345–351.
- [18] Savu C. Savulescu, *Solving Open Access Transmission and Security Analysis Problems With The Short-Circuit Current Method*, Latin Power Conference Controlling and Automating Energy Session, August 27, 2002, Monterrey, Mexico
- [19] S. Massucco, A. Pitto and F. Silvestro, *Evaluation of Some Indices for Voltage Stability Assessment*, IEEE Bucharest Power Tech Conference, June 28<sup>th</sup>,2009, Romania
- [20] B. Jeyasurya, *Artificial Neural Network for Power System Steady-State Voltage Instability Evaluation*, Electric Power System Research 29, 1994, pp.85–90
- [21] T.X. Zhu, S.K. Tso, and K.L. Lo, *An Investigation into the OLTC Effect on Voltage Collapse*, IEEE Transaction on Power System, Vol.15, No.2, May 200, pp.515–521
- [22] A.C. Zambroni de Souza, *Discussion on Some Voltage Collapse Indices*, Electric Power System Research 53, 2000, pp.53–58
- [23] C.W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, New York, McGraw Hill,1994

- [24] Mauridhi Hery Purnomo, Agus Kurniawan, *Supervised Neural Network dan Aplikasinya*, Graha Ilmu, 2006
- [25] M.M. Salama, E.M. Saied, SM. Abdel-Maksoud, *Steady State Instability in a Power System*, Energy Conversion & Management 40, 1999, pp.59–69
- [26] M.R. Aghamohammadi, M. Mohammadian, and H. Saitoh, *Sensitivity Characteristic of Neural Network as A Tool for Analyzing and Improving Voltage Stability*, IEEE Conference PWS, 2002, pp.1128–1132
- [27] H.C. Nallan, P. Rastgoufard, *Computational Voltage Stability Assessment of Large-Scale Power Systems*, Electric Power System Research 38, 1997, pp.177–181
- [28] C. Subramani, S.S. Dash, M. Arun Bhaskar, M. Jagadeeshkumar, and K. Balaji, *Soft Computing for Voltage Stability Analysis and Contingency Ranking in Power System*, International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, 2009
- [29] Kip Morison, Hamid Hamadani and Lei Wang, *Load Modeling for Voltage Stability Studies*, IEEE Conference Power System 2006, pp.564–568
- [30] Robert Pliszcak, *Loads and Synchronous Generator Modelling*, IEEE Conference, 2008
- [31] M. Moghavvemi, M.O. Faruque, *Power System Security and Voltage Collapse: A Line Outage Based Indicator for Prediction*, Electric Power System Research 21, 1999, pp.455–461
- [32] Yang Wang, Wenyuan Li and Jiping Lu, *A New Node Voltage Stability Index Based on Local Voltage Phasors*, Electric Power System Research 79, 2009, pp.265–271
- [33] K. Ramalingan and C.S. Indulkar, *Determination of Steady State Voltage Stability Limit Using PQ Curves for Voltage Sensitive Loads*, IEEE Conference Power System 2008.
- [34] M.Z. El-Sadek, G.A. Mahmoud, M.M. Dessouky and W.I. Rashed, *Optimum Load Shedding for Avoiding Steady-State Voltage Instability*, Electric Power System Research 50, 1999, pp.119–123

- [35] Horia S. Campeanu, Eric L. Helguen, Yasmine Assef, Nicolas Vidal, and Savu C.Savulescu, *Real-Time Stability Monitoring at Transelectrica*, IEEE Power Systems Conference & Exposition 2006, Atlanta, GA, October 29 - November 2, 2006
- [36] M.Z. El-Sadek, G.A. Mahmoud, M.M. Dessouky, W.I. Rashed, *Tap Changing Transformer Role In Voltage Stability Enhancement*, Electric Power System Research 50 (1999) pp.115–118
- [37] Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y., Siew, C.-K.: ‘Extreme learning machine: theory and applications’, *Neurocomputing*, 2006, 70, pp. 489–501
- [38] Huang, G.-B, Xiaojian Ding, Hongming Zhou, Optimization Method Based Extreme Learning Machine for Classification, *Neurocomputing*, 2010, 74, pp.155–163
- [39] Indar Chaerah Gunadin, Adi Suprijanto, Ontoseno Penangsang, “A Novel Method for Steady State Stability Limit Assessment” Proceeding of The 3<sup>rd</sup> International Student Conference on Advanced Science and Technology (ICAST), Seoul, Korea, 2009.
- [40] Indar Chaerah Gunadin, Adi Suprijanto, Ontoseno Penangsang, ”Study on Effect of STATCOM Installation to Improved Voltage Stability in East Indonesia System”, Proceeding of National Seminar on Applied Technology, Science, and Art (APTECS), Surabaya, December 22, 2009.
- [41] Indar Chaerah Gunadin, Nadjamuddin Harun, Adi Suprijanto, ”Transient Stability on East Indonesia System”, Proceeding of National Seminar on Applied Technology, Science, and Art (APTECS), Surabaya, December 22<sup>th</sup>, 2009.
- [42 ] Indar Chaerah Gunadin, Adi Suprijanto, Ontoseno Penangsang, *Effect of VAR Support Installation to Improved Voltage Stability in East Indonesia System*, Proceeding of Basic Science National Seminar 7<sup>th</sup>, February 20<sup>th</sup>, 2010.
- [43] Indar Chaerah Gunadin, Ontoseno Penangsang, Adi Suprijanto, *Influence of Load Characteristics Against Voltage Collapse Phenomena*, International Conference (ICEME 2010) April 6th - 9th, Orlando, Florida USA, 2010
- [44] Data source of Indonesian Utility Company: *Operation Report and history of Black-Out in South Sulawesi East-Indonesia Power System*, AP2B PLN South Sulawesi Area, 2010

- [45] Buyung Baskoro, Analisis Aliran Daya Optimal Menggunakan Algoritma Genetika Pada Sistem Interkoneksi 500 KV Jawa Bali, Tugas akhir – RE1599, ITS, 2009
- [46] I. C. Gunadin, S. M. Said, and M. Irsan, “*Determination of stability index of electrical power system using Rei-Dimo methods,*” Journal of Theoretical and Applied Information Technology, vol. 90, no. 1, pp. 161-167, August 2016

# LAMPIRAN

P1	Q1	V1	δ1	P2	Q2	V2	δ2	P3	Q3	V3	δ3	P4	Q4	V4	δ4	P5	Q5	V5	δ5	P6	Q6	V6
1905.766	969.249	1.02	0	1040	477.49	1	-2.607	1008	369.476	1	-3.205	400	540.979	1	-3.696	1220	61.527	1	-3.134	1050	135.788	1
2149.536	1046.004	1.02	0	1040	533.581	1	-3.389	1008	402.502	1	-4.05	400	605.928	1	-4.539	1220	67.582	1	-4.802	1050	138.568	1
2388.82	1128.699	1.02	0	1040	592.34	1	-4.164	1008	456.63	1	-4.889	400	675.341	1	-5.377	1220	67.5341	1	-6.472	1050	141.966	1
2623.349	1217.226	1.02	0	1040	653.794	1	-4.932	1008	471.904	1	-5.72	400	749.285	1	-6.207	1220	81.95	1	-8.144	1050	146.013	1
2852.826	1311.466	1.02	0	1040	717.973	1	-5.692	1008	508.37	1	-6.544	400	827.832	1	-7.031	1220	90.316	1	-9.819	1050	150.745	1
3076.92	1411.288	1.02	0	1040	784.903	1	-6.444	1008	546.078	1	-7.359	400	911.063	1	-7.847	1220	99.51	1	-11.497	1050	156.201	1
3295.261	1516.545	1.02	0	1040	854.612	1	-7.186	1008	585.081	1	-8.165	400	999.059	1	-8.655	1220	109.565	1	-13.179	1050	162.424	1
3507.439	1627.068	1.02	0	1040	927.124	1	-7.919	1008	625.433	1	-8.962	400	1091.905	1	-9.454	1220	120.52	1	-14.864	1050	169.463	1
3712.993	1742.663	1.02	0	1040	1002.46	1	-8.639	1008	667.195	1	-9.747	400	1189.688	1	-10.242	1220	132.415	1	-16.554	1050	177.371	1
3911.407	1863.104	1.02	0	1040	1080.632	1	-9.348	1008	710.425	1	-10.519	400	1292.493	1	-11.019	1220	145.296	1	-18.247	1050	186.209	1
4102.105	1988.129	1.02	0	1040	1161.646	1	-10.042	1008	755.188	1	-11.278	400	1400.4	1	-11.782	1220	159.212	1	-19.943	1050	196.041	1
4284.439	2117.427	1.02	0	1040	1245.493	1	-10.719	1008	801.546	1	-12.02	400	1513.478	1	-12.531	1220	174.215	1	-21.642	1050	206.942	1
4457.683	2250.631	1.02	0	1040	1332.145	1	-11.378	1008	849.564	1	-12.743	400	1631.783	1	-13.262	1220	190.362	1	-23.342	1050	218.992	1
4621.018	2387.305	1.02	0	1040	1421.555	1	-12.016	1008	899.301	1	-12.016	400	1755.347	1	-13.973	1220	207.712	1	-25.042	1050	232.282	1
4773.528	2526.932	1.02	0	1040	1513.64	1	-12.629	1008	950.815	1	-14.123	400	1884.167	1	-14.661	1220	226.327	1	-26.74	1050	246.908	1
4914.186	2668.897	1.02	0	1040	1608.279	1	-13.214	1008	1004.152	1	-14.772	400	2018.189	1	-15.322	1220	246.27	1	-28.433	1050	262.98	1
5041.842	2812.466	1.02	0	1040	1705.295	1	-13.767	1008	1059.343	1	-15.388	400	2157.294	1	-15.951	1220	267.601	1	-30.116	1050	280.614	1
5155.218	2956.769	1.02	0	1040	1804.443	1	-14.281	1008	1116.398	1	-15.966	400	2301.265	1	-16.544	1220	290.375	1	-31.784	1050	299.934	1
5252.907	3100.776	1.02	0	1040	1905.389	1	-14.752	1008	1175.29	1	-16.499	400	2449.756	1	-17.093	1220	314.656	1	-33.431	1050	321.071	1
5333.379	3243.273	1.02	0	1040	2007.685	1	-15.172	1008	1235.946	1	-16.979	400	2602.247	1	-17.593	1220	340.404	1	-35.046	1050	344.158	1
5395.007	3382.842	1.02	0	1040	2110.741	1	-15.534	1008	1298.222	1	-17.4	400	2757.987	1	-18.034	1220	367.67	1	-36.619	1050	369.32	1
5436.118	3517.849	1.02	0	1040	2213.791	1	-15.829	1008	1361.877	1	-17.751	400	2915.922	1	-18.408	1220	396.368	1	-38.135	1050	396.669	1
5455.026	3646.411	1.02	0	1040	2315.851	1	-16.048	1008	1426.546	1	-18.024	400	3074.583	1	-18.706	1220	426.358	1	-39.574	1050	426.286	1
5450.365	3766.518	1.02	0	1040	2415.725	1	-16.182	1008	1491.7	1	-18.208	400	3232.085	1	-18.917	1220	457.396	1	-40.914	1050	458.183	1
5449.611	3771.497	1.02	0	1040	2419.982	1	-16.186	1008	1494.524	1	-18.213	400	3238.848	1	-18.924	1220	458.759	1	-40.969	1050	459.616	1
5449.551	3771.88	1.02	0	1040	2420.309	1	-16.186	1008	1494.741	1	-18.214	400	3239.368	1	-18.924	1220	458.864	1	-40.973	1050	459.727	1
5449.491	3772.262	1.02	0	1040	2420.636	1	-16.187	1008	1494.958	1	-18.214	400	3239.888	1	-18.925	1220	458.969	1	-40.978	1050	459.837	1
1805.405	939.758	1.02	0	1040	455.437	1	-2.287	1008	356.351	1	-2.859	400	515.828	1	-3.351	1220	59.272	1	-2.456	1050	134.827	1
2010.307	1001.264	1.02	0	1040	501.097	1	-2.942	1008	383.435	1	-3.566	400	568.149	1	-4.056	1220	64.021	1	-3.846	1050	136.9	1
2212.192	1066.937	1.02	0	1040	548.6	1	-3.591	1008	411.267	1	-4.269	400	623.544	1	-4.758	1220	69.277	1	-5.236	1050	139.391	1
2410.915	1136.716	1.02	0	1040	597.961	1	-4.236	1008	439.873	1	-4.967	400	682.05	1	-5.454	1220	75.055	1	-6.628	1050	142.315	1
2606.318	1210.538	1.02	0	1040	649.196	1	-5.659	1008	469.277	1	-5.659	400	743.707	1	-6.147	1220	81.369	1	-8.021	1050	145.693	1

$\delta 6$	P7	Q7	V7	$\delta 7$	P8	Q8	V8	$\delta 8$	PL	QL	VL	$\delta L$	d	e	SSSL
-11.839	3254	5749.15	1	-19.846	150	86.439	1	-15.927	10582	4148.144	0.946	-28.883	61.256	120.55	-59.294
-13.716	3254	5988.394	1	-21.829	150	86.462	1	-17.855	10882	4265.744	0.942	-31.082	61.4634	120.3587	-58.8953
-15.596	3254	6239.383	1	-23.816	150	86.768	1	-19.788	11182	4383.344	0.938	-33.297	61.6917	120.1497	-58.4581
-17.48	3254	6502.706	1	-25.81	150	87.373	1	-21.725	11482	4500.944	0.934	-35.529	61.9432	119.9227	-57.9795
-19.369	3254	6779.014	1	-27.81	150	88.292	1	-23.667	11782	4618.544	0.929	-37.781	62.2209	119.6769	-57.456
-21.263	3254	7069.029	1	-29.817	150	89.544	1	-25.616	12082	4736.144	0.924	-40.054	62.5282	119.4115	-56.8833
-23.162	3254	7373.551	1	-31.832	150	91.15	1	-27.572	12382	4853.744	0.919	-42.349	62.8692	119.1256	-56.2564
-25.068	3254	7693.466	1	-33.856	150	93.131	1	-29.535	12682	4971.344	0.914	-44.669	63.2487	118.8183	-55.5696
-26.979	3254	8029.76	1	-35.888	150	95.511	1	-31.505	12982	5088.944	0.908	-47.014	63.673	118.49	-54.816
-28.898	3254	8383.528	1	-37.929	150	98.318	1	-33.482	13282	5206.544	0.903	-49.387	64.149	118.14	-53.986
-30.822	3254	8755.988	1	-39.978	150	101.582	1	-35.467	13582	5324.144	0.896	-51.788	64.687	117.76	-53.07
-32.752	3254	9148.496	1	-42.036	150	105.333	1	-37.459	13882	5441.744	0.89	-54.22	65.297	117.35	-52.056
-34.686	3254	9562.563	1	-44.1	150	109.609	1	-39.456	14182	5559.344	0.883	-56.683	65.995	116.92	-50.925
-36.623	3254	9999.873	1	-46.171	150	114.447	1	-41.458	14482	5676.944	0.876	-59.179	66.801	116.46	-49.658
-38.562	3254	10462.3	1	-48.245	150	119.89	1	-43.463	14782	5794.544	0.869	-61.708	67.739	115.97	-48.227
-40.498	3254	10951.92	1	-50.319	150	125.981	1	-45.466	15082	5912.144	0.861	-64.27	68.846	115.44	-46.594
-42.428	3254	11471.03	1	-52.389	150	132.767	1	-47.464	15382	6029.744	0.853	-66.864	70.171	114.88	-44.707
-44.346	3254	12022.17	1	-54.45	150	140.298	1	-49.451	15682	6147.344	0.844	-69.489	71.787	114.28	-42.494
-46.245	3254	12608.08	1	-56.492	150	148.622	1	-51.42	15982	6264.944	0.835	-72.141	73.803	113.64	-39.84
-48.115	3254	13231.72	1	-58.507	150	157.784	1	-53.361	16282	6382.544	0.826	-74.815	76.399	112.96	-36.566
-49.943	3254	13896.15	1	-60.479	150	167.824	1	-55.26	16582	6500.144	0.815	-77.504	79.889	112.24	-32.354
-51.713	3254	14604.46	1	-62.392	150	178.767	1	-57.1	16882	6617.744	0.805	-80.195	84.9	111.48	-26.578
-53.403	3254	15359.74	1	-64.222	150	190.618	1	-58.86	17182	6735.344	0.793	-82.873	92.902	110.67	-17.766
-54.989	3254	16164.18	1	-65.94	150	203.344	1	-60.512	17482	6852.944	0.781	-85.515	108.58	109.81	-1.2376
-55.055	3254	16200.18	1	-66.011	150	203.914	1	-60.581	17495	6858.04	0.781	-85.629	109.63	109.78	-0.14974
-55.06	3254	16202.96	1	-66.017	150	203.958	1	-60.586	17496	6858.432	0.781	-85.637	109.71	109.77	-0.06402
-55.065	3254	16205.73	1	-66.022	150	204.002	1	-60.591	17497	6858.824	0.781	-85.646	109.79	109.77	0.022002
-11.076	3254	5655.093	1	-19.041	150	86.507	1	-15.143	10460	4100.32	0.948	-27.993	61.1773	120.6233	-59.4459
-12.64	3254	5849.826	1	-20.691	150	86.415	1	-16.749	10710	4198.32	0.945	-29.819	61.342	120.47	-59.128
-14.205	3254	6052.499	1	-22.345	150	86.514	1	-18.357	10960	4296.32	0.941	-31.656	61.521	120.31	-58.785
-15.772	3254	6263.428	1	-24.002	150	86.812	1	-19.968	11210	4394.32	0.938	-33.504	61.714	120.13	-58.415
-17.342	3254	6482.963	1	-25.663	150	87.318	1	-21.583	11460	4492.32	0.934	-35.365	61.924	119.94	-58.016

## LAMPIRAN : A2

Hubungan Indeks Kestabilan Dengan Daya dan Tegangan Pada Beban Untuk Metode Merit Order

<b>P</b>	<b>Q</b>	<b>V</b>	<b>Indeks Stability</b>
10282	4032	0.941	-58.226
10582	4148.144	0.937	-57.75
10882	4265.744	0.932	-57.229
11182	4383.344	0.928	-56.657
11482	4500.944	0.923	-56.03
11782	4618.544	0.917	-55.341
12082	4736.144	0.912	-54.581
12382	4853.744	0.906	-53.743
12682	4971.344	0.9	-52.813
12982	5088.944	0.894	-51.776
13282	5206.544	0.887	-50.614
13582	5324.144	0.88	-49.3
13882	5441.744	0.873	-47.801
14182	5559.344	0.865	-46.067
14482	5676.944	0.857	-44.029
14782	5794.544	0.848	-41.579
15082	5912.144	0.839	-38.542
15382	6029.744	0.829	-34.605
15682	6147.344	0.819	-29.129
15982	6264.944	0.808	-20.543
16282	6382.544	0.796	-3.3745
16315	6398	0.795	-0.26353
<b>16319</b>	6413.367	0.795	-0.048409

Hubungan Indeks Kestabilan Dengan Daya dan Tegangan Pada Beban Untuk  
Metode Optimasi Pembangkit Menggunakan GA

<b>P</b>	<b>Q</b>	<b>V</b>	<b>Indeks Stability</b>
10282	4032	0.935	-57.191
10582	4148.144	0.93	-56.644
10882	4265.744	0.925	-56.044
11182	4383.344	0.92	-55.384
11482	4500.944	0.915	-54.659
11782	4618.544	0.909	-53.858
12082	4736.144	0.903	-52.972
12382	4853.744	0.897	-51.987
12682	4971.344	0.891	-50.885
12982	5088.944	0.884	-49.644
13282	5206.544	0.877	-48.235
13582	5324.144	0.869	-46.616
13882	5441.744	0.861	-44.731
14182	5559.344	0.852	-42.495
14482	5676.944	0.843	-39.774
14782	5794.544	0.834	-36.348
15082	5912.144	0.824	-31.805
15382	6029.744	0.813	-25.26
15682	6147.344	0.801	-14.3
15782	6186.544	0.797	-8.5137
15832	6206.144	0.795	-4.8751
15842	6210.064	0.795	-4.0686
15872	6221.824	0.794	-1.4615
15882	6225.744	0.793	-0.52302
<b>15887</b>	6227.704	0.793	-0.039426

Hubungan Indeks Kestabilan Dengan Daya dan Tegangan Pada Beban Untuk  
Metode Optimasi Pembangkit Menggunakan GA-NN

<b>P</b>	<b>Q</b>	<b>V</b>	<b>Indeks Stability</b>
10282	4032	0.925	-55.554
10582	4148.144	0.92	-54.881
10882	4265.744	0.915	-54.138
11182	4383.344	0.909	-53.317
11482	4500.944	0.903	-52.404
11782	4618.544	0.897	-51.384
12082	4736.144	0.89	-50.238
12382	4853.744	0.884	-48.939
12682	4971.344	0.876	-47.452
12982	5088.944	0.869	-45.725
13282	5206.544	0.86	-43.686
13582	5324.144	0.852	-41.219
13882	5441.744	0.843	-38.134
14182	5559.344	0.833	-34.085
14482	5676.944	0.823	-28.342
14782	5794.544	0.811	-18.993
14982	5872.944	0.804	-7.7698
15032	5892.544	0.802	-3.5933
15062	5904.304	0.8	-0.64757
15067	5906.264	0.8	-0.11788
<b>15068</b>	5906.656	0.8	-0.010496

Hubungan Indeks Kestabilan Dengan Daya dan Tegangan Pada Beban Untuk Metode Optimasi Pembangkit Menggunakan Lagrange

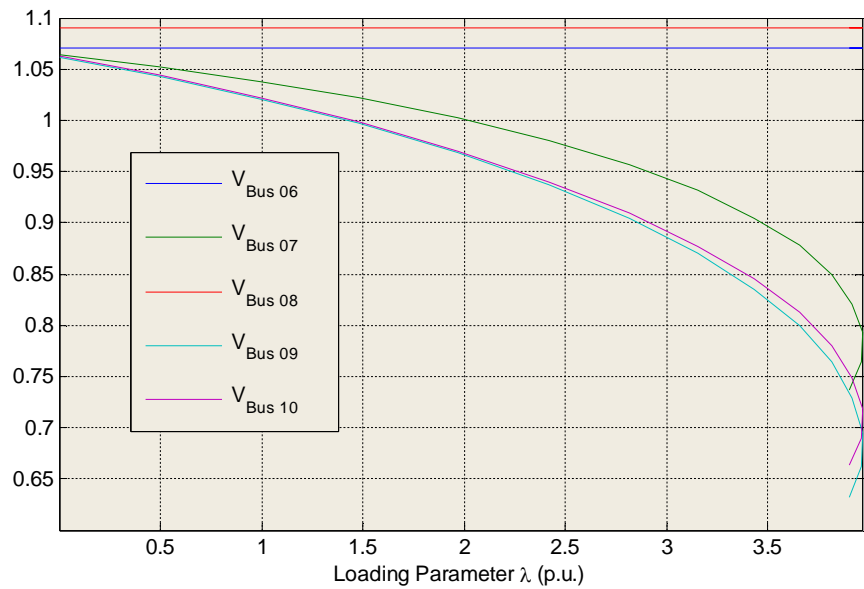
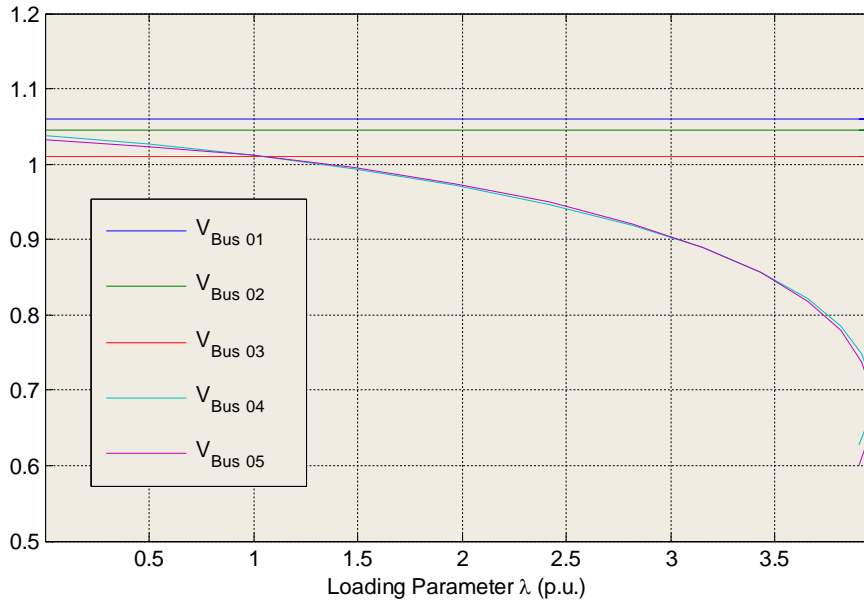
<b>P</b>	<b>Q</b>	<b>V</b>	<b>Indeks Stability</b>
10282	4032	0.95	-59.657
10582	4148.144	0.946	-59.294
10882	4265.744	0.942	-58.895
11182	4383.344	0.938	-58.458
11482	4500.944	0.934	-57.98
11782	4618.544	0.929	-57.456
12082	4736.144	0.924	-56.883
12382	4853.744	0.919	-56.256
12682	4971.344	0.914	-55.57
12982	5088.944	0.908	-54.816
13282	5206.544	0.903	-53.986
13582	5324.144	0.896	-53.07
13882	5441.744	0.89	-52.056
14182	5559.344	0.883	-50.925
14482	5676.944	0.876	-49.658
14782	5794.544	0.869	-48.227
15082	5912.144	0.861	-46.594
15382	6029.744	0.853	-44.707
15682	6147.344	0.844	-42.494
15982	6264.944	0.835	-39.84
16282	6382.544	0.826	-36.566
16582	6500.144	0.815	-32.354
16882	6617.744	0.805	-26.578
17182	6735.344	0.793	-17.766
17482	6852.944	0.781	-1.2376
17495	6858.04	0.781	-0.14974
17496	6858.432	0.781	-0.06402
<b>17497</b>	<b>6858.824</b>	<b>0.781</b>	<b>0.022002</b>

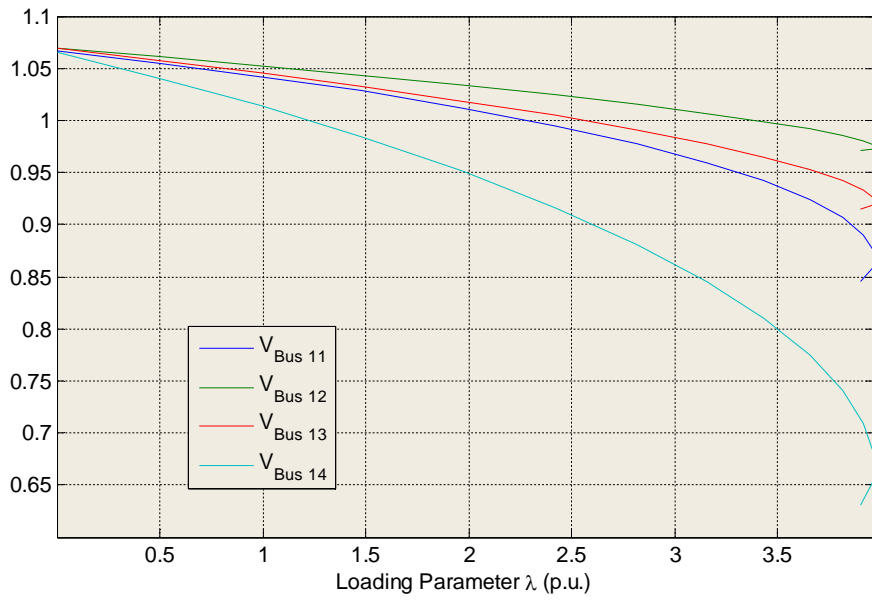
Hubungan Indeks Kestabilan Dengan Daya dan Tegangan Pada Beban Untuk  
Metode Optimasi Pembangkit Menggunakan Impedansi Thevenin

P	Q	V	Indeks Stability
10282	4032	0.956	-60.49
10582	4148.144	0.952	-60.188
10882	4265.744	0.949	-59.855
11182	4383.344	0.945	-59.488
11482	4500.944	0.941	-59.086
11782	4618.544	0.936	-58.645
12082	4736.144	0.932	-58.162
12382	4853.744	0.927	-57.635
12682	4971.344	0.922	-57.059
12982	5088.944	0.917	-56.428
13282	5206.544	0.912	-55.738
13582	5324.144	0.906	-54.981
13882	5441.744	0.9	-54.149
14182	5559.344	0.894	-53.232
14482	5676.944	0.888	-52.216
14782	5794.544	0.881	-51.087
15082	5912.144	0.874	-49.823
15382	6029.744	0.867	-48.397
15682	6147.344	0.859	-46.775
15982	6264.944	0.851	-44.905
16282	6382.544	0.842	-42.717
16582	6500.144	0.833	-40.103
16882	6617.744	0.824	-36.891
17182	6735.344	0.813	-32.781
17482	6852.944	0.803	-27.192
17782	6970.544	0.792	-18.784
18082	7088.144	0.78	-3.5415
18122	7103.824	0.778	-0.40761
<b>18126</b>	7105.392	0.778	-0.071061

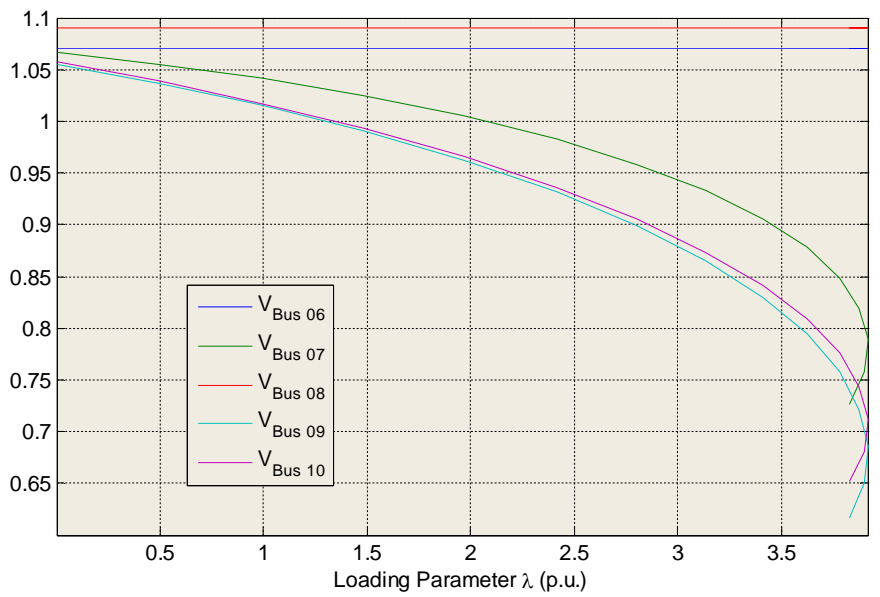
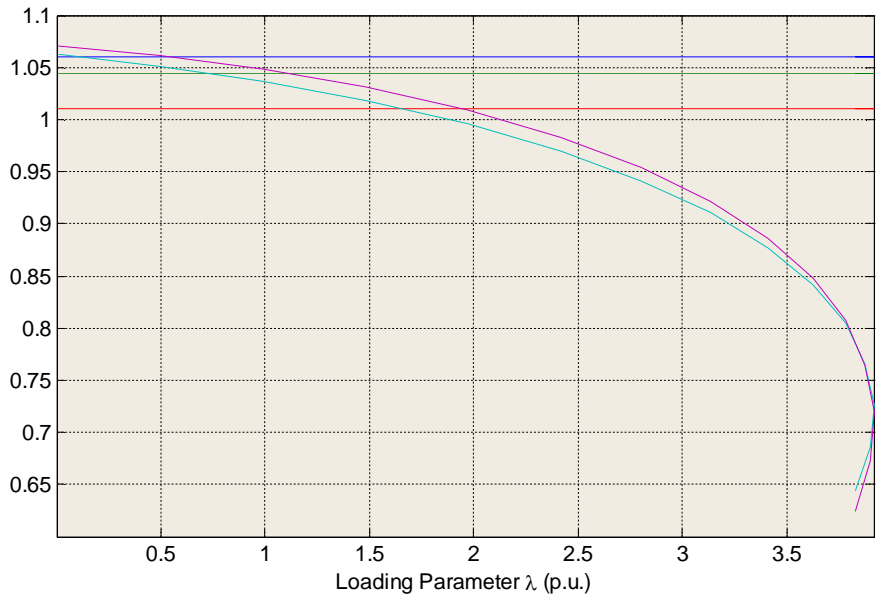
KASUS I:

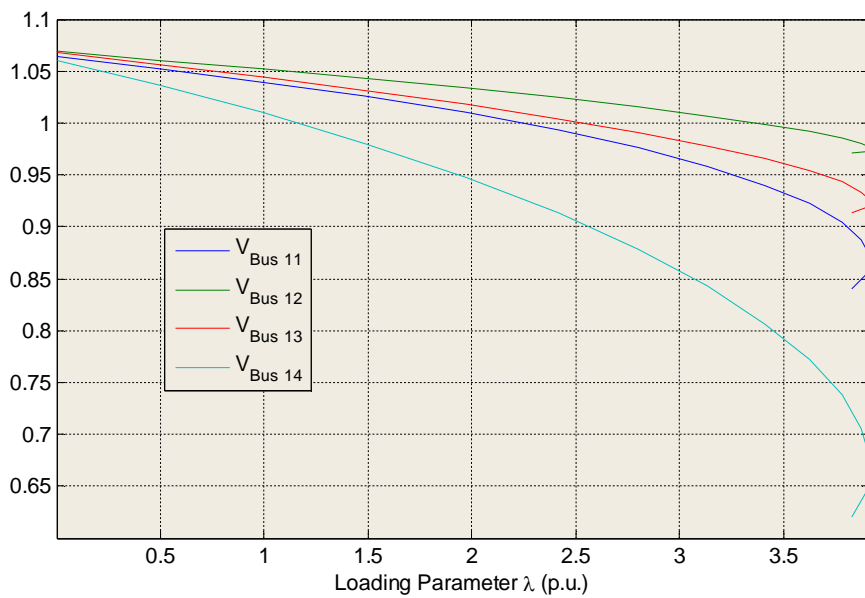
Kurva PV untuk kasus I



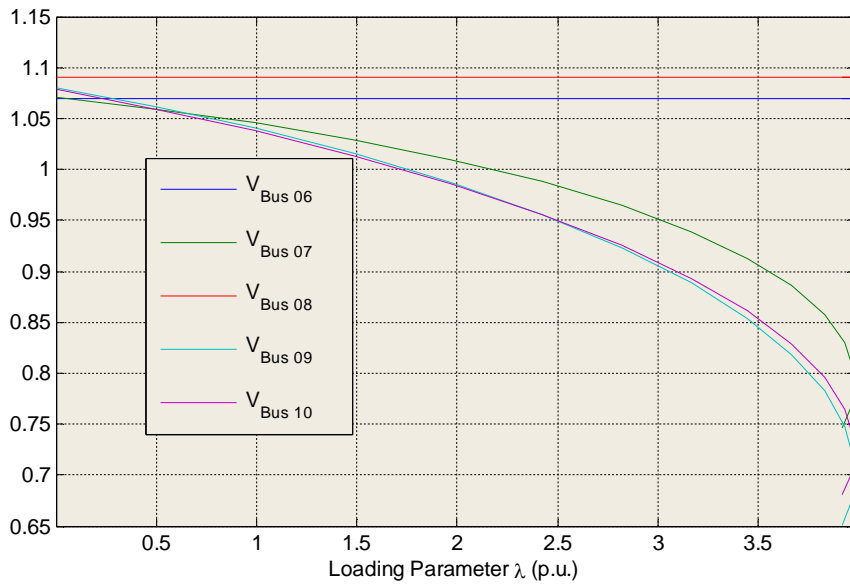
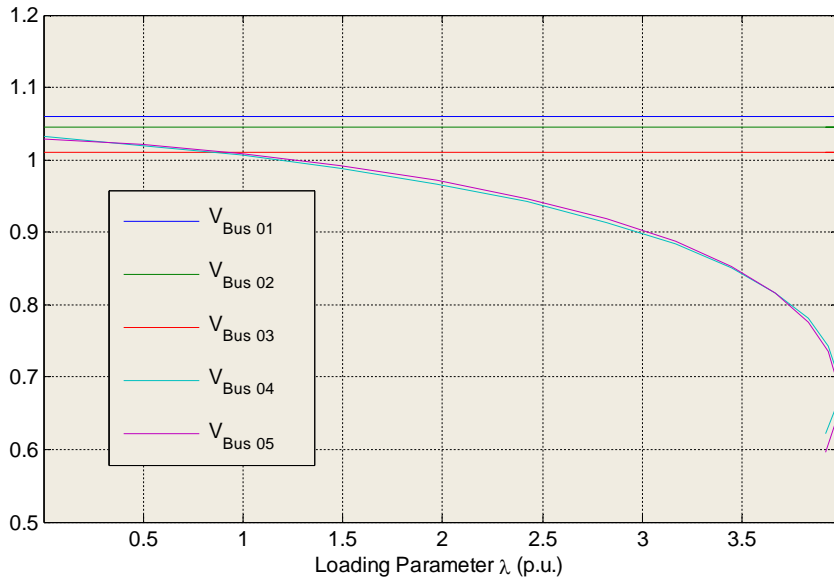


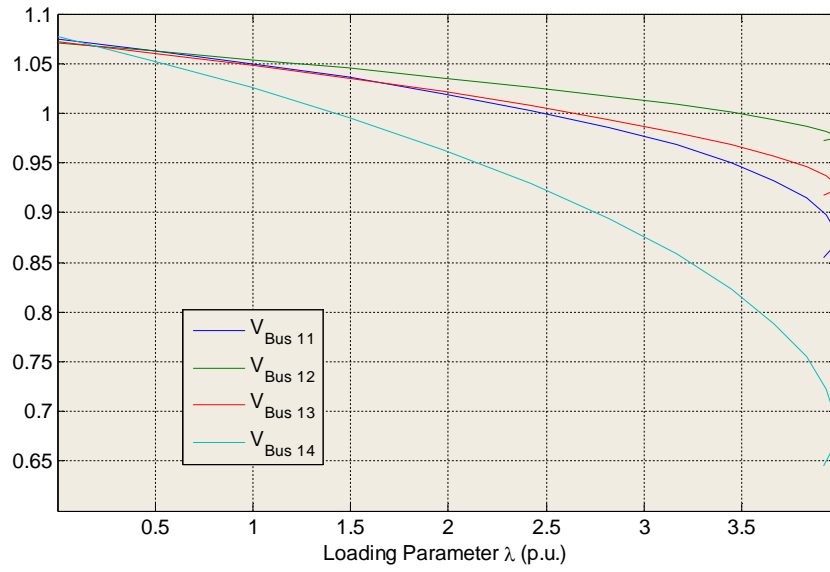
KASUS II :





KASUS III :





# Steady State Stability Assessment Using Extreme Learning Machine Based on Modal Analysis

Indar Chaerah Gunadin<sup>1,2</sup>, Adi Soeprijanto<sup>1</sup>, Ontoseno Penangsang<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut Teknologi Sepuluh Nopember, <sup>2</sup> Universitas Hasanuddin

**Abstract** – The growth of electricity market led to increase utilization and higher loading of the electric transmission grids worldwide. This situation made power system operate close to steady-state stability limit (SSSL). It could trigger a voltage instability or a voltage collapse phenomenon. An assessment approach on steady state stability analysis was provided using Extreme Learning Machine taking the Modal Analysis as an assessment index. The nonlinear problem between voltage, power flow and participation factor in power system could be solved by Extreme Learning Machine. The method was tested on the IEEE 14 bus and Java-Bali system. The simulation results showed that the proposed method could accurately predict the weakest bus in power system. **Copyright © 2012 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.**

**Keywords:** Voltage Collapse, Steady State Stability, Extreme Learning Machine, Modal Analysis

## Nomenclature :

$\Delta P$	active power
$\Delta Q$	reactive power mismatch
$J$	Jacobian matrix
$J_R$	Jacobian reduction matrix
$\Delta V$	voltage magnitude
$\Delta \theta$	angle correction
$\Phi$	right eigenvector matrix of $J_R$
$\Gamma$	left eigenvector matrix of $J_R$
$\Lambda$	diagonal eigenvalue matrix of $J_R$
$P_{ki}$	participation of the $k^{th}$ bus in $i^{th}$ mode

factor, the weakest bus or node can be determined - which is the greatest contributing factor for a system to reach a voltage collapse situation-[2].

This paper proposes an artificial intelligent namely a Extreme Learning Machine (ELM) approach for an assessment of steady state stability. The nonlinear characteristic between power flow and voltages on load bus with given load increases mode. However, as the operating conditions of a power system continuously changes, it is difficult to calculate the bus participation factor for each load bus directly by the mathematical analysis on line. As a result, this paper presents ELM method to estimate the participation factor sequentially to assess the system voltage stability rapidly and timely.

## I. Introduction

Nowadays, in electric power system, load growth is not accompanied by the rapid development of transmission networks and generation capacity. This condition will cause the electric power system to operate at conditions that are particularly vulnerable to the phenomenon of a voltage instability or a voltage collapse. Nowadays, the voltage collapse has become a very important issue in the operation of electric power systems [1-3].

There are many researchers who have evaluated the technique to predict a voltage collapse in power systems. Morison and Kundur provide a method named Modal Analysis. This method is performed by calculating the eigen value and eigenvector of the Jacobian reduction matrix of system power. Power system stability condition can be determined by observing the results of these eigen values. If all the eigen values are positive, the system is considered to be in a stable condition. On the other hand, if eigen values are negative, the system is considered to be in an unstable voltage.

Furthermore, by applying methods of bus participation

## II. The Modal Analysis

The modal analysis or eigen value analysis can be used effectively as a powerful analytical tool to verify both proximity and mechanism of a voltage instability. It involves the calculation of a small number of eigen values and related eigenvectors of a reduced Jacobian matrix. However, by using the reduced Jacobian matrix, the focus is on the voltage and the reactive power characteristics. The weak modes (weak buses) of the system can be identified from the system reactive power variation sensitivity to incremental change in bus voltage magnitude. The stability margin or distance to voltage collapse can be estimated by generating the Q-V curves for that particular bus. Load characteristics have been found to have significant effect on power system stability. A simplified voltage dependent real and reactive power load model is used to figure out that effect. Induction machine is one of the important power system loads. It influences the system voltage stability

especially when large amount of such load is installed in the system[3].

Equation (1) represents the power flow equation in power system at such as an operating system.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{11} & \mathbf{J}_{12} \\ \mathbf{J}_{21} & \mathbf{J}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

With asumption  
 $\Delta P = 0$

$$\Delta P = 0 = \mathbf{J}_{11} \Delta \theta + \mathbf{J}_{12} \Delta V, \Delta \theta = -\mathbf{J}_{11}^{-1} \mathbf{J}_{12} \Delta V \quad (2)$$

and

$$\Delta Q = \mathbf{J}_{21} \Delta \theta + \mathbf{J}_{22} \Delta V \quad (3)$$

Substituting equation (2) in equation (3) :

$$\Delta Q = \mathbf{J}_R \Delta V \quad (4)$$

where :

$$\mathbf{J}_R = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_{22} - \mathbf{J}_{21} \mathbf{J}_{11}^{-1} \mathbf{J}_{12} \end{bmatrix}$$

The matrix  $\mathbf{J}_R$  represents the linearized relationship between the incremental changes in bus voltage ( $\Delta V$ ) and bus reactive power injection ( $\Delta Q$ ).

Voltage instability can be detected by identifying modes of the eigenvalues matrix  $\mathbf{J}_R$ . Eigenvalue analysis of  $\mathbf{J}_R$  results in the following :

$$\mathbf{J}_R = \Phi \Lambda \Gamma \quad (6)$$

By changing the  $\mathbf{J}_R$  to  $\mathbf{J}_R^{-1}$  :

$$\mathbf{J}_R^{-1} = \Phi \Lambda^{-1} \Gamma$$

If  $\Phi_i$  and  $\Gamma_i$  represent the right- and left- hand eigenvectors respectively for the eigenvalue  $\lambda_i$  of the matrix  $\mathbf{J}_R$ , the participation factor measuring the participation of the  $k^{th}$  bus in  $i^{th}$  mode is defined as :

$$P_{ki} = \Phi_{ki} \Gamma_{ik} \quad (10)$$

So the eigenvalues of importance are the critical eigenvalues of the reduced Jacobian matrix  $\mathbf{J}_R$ . Thus, the smallest eigenvalues of  $\mathbf{J}_R$  are taken to be the least stable modes of the system. The rest of the eigenvalues are neglected because they are considered to be strong enough modes. Once the minimum eigenvalues and the corresponding left and right eigenvectors have been calculated, the participation factor can be used to identify the weakest node or bus in the system[2-3].

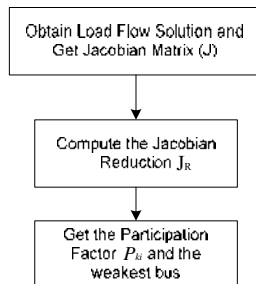


Fig. 1. Algorithm of Modal Analysis

### III. Extreme Learning Machine

Conventional methods such as back-propagation (BP) and the method of Levenberg-Marquardt (LM) have been used extensively in training neural networks although this algorithm is relatively slow in learning. A new learning method for single-hidden-layer feed forward neural-networks (SLFNs) is the so-called extreme learning machine (ELM). In ELM, the input weights and hidden biases are randomly chosen. The output weights obtained using the Moore-Penrose (MP) generalize inverse. ELM has the capability in terms of speed and it is easier than traditional methods of gradient-based learning algorithms [8-9].

In ELM, the input weights and hidden biases are generated randomly. Furthermore, the nonlinear system has been transformed into a linear system:

$$\mathbf{H} \beta = \mathbf{T}$$

Whereas named in Huang et al. [15],  $\mathbf{H} = \{\mathbf{h}_{ij}\}$  ( $i=1, \dots, N$  and  $j=1, \dots, K$ ) is hidden-layer output matrix,  $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K]^T$  is matrix of output weights and  $\mathbf{T} = [\mathbf{t}_1, \mathbf{t}_2, \dots, \mathbf{t}_N]^T$  is matrix of targets.

In this paper, ELM is utilized to map the highly non-linear relationship between network voltage profile, power generation of power system and the corresponding bus participation factor of power system. First, the simulation starts with running the power flow program for IEEE 14 bus and Java-Bali system. Then, by using Modal Analysis, the weakest bus of each cases will be obtained. The data from modal analysis will be training in ELM.

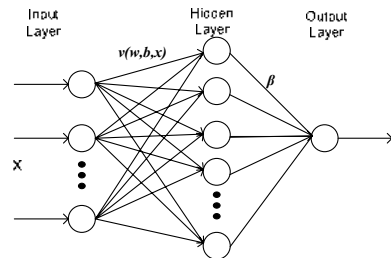


Fig. 2. Structure of an SLF-NN

### IV. Application of Extreme Learning Machine

Bus participation factor values were obtained from the Modal Analysis method and then trained at Extreme Learning Machine. Data input was the generator bus voltage, active power and reactive generator, four of the largest values of participation factor, the change of power at the load bus.

In this simulation, the input data used was as many as 150 data in which 30 data were used as testing data. Algorithm of this study can be seen in fig. 4.

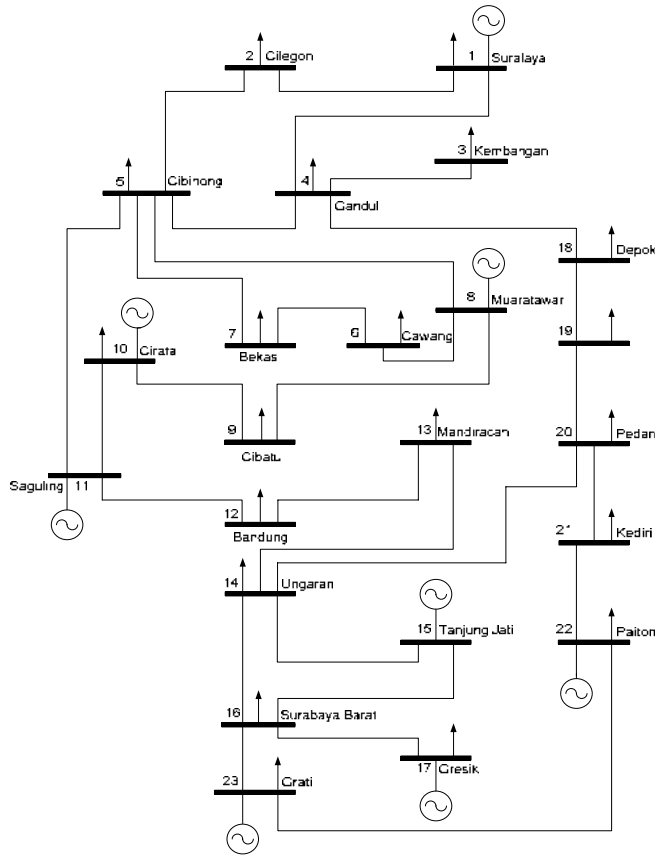


Fig. 3. Single Line Diagram of 500 kV Java-Bali Power System

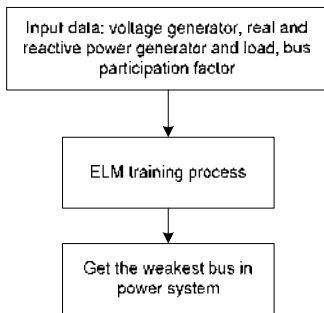


Fig. 4. Simulation process of ELM Method

Application of Modal Analysis method for IEEE-14 bus and Java-Bali system would obtain the bus participation factor values as shown in Fig. 5 and Fig. 6.

In this simulation, the relationship between changes in bus loads to the bus participation factor would be obtained.

The load on bus number 4 has been changed, so for any changes in this value, the new participation factor for all load buses would be obtained. The value of participation factor was taken as the input data. This data were limited to 4 ELM greatest value of participation factor, namely: Bus 9, Bus 10, Bus 11 and Bus 14.

Active and reactive power data for generator, the voltage at any bus generator, the voltage at the load bus, and load change at bus 4 were used as input data and the fourth largest participation values were used as data output for the ELM method, as shown in table 1.

Activation function in this simulation was the sigmoid method. After the simulation, the results obtained were:

Average Testing Accuracy = 2.6383e-004  
 Average Training Accuracy = 3.1689e-024  
 Average Training Time = 0.1477  
 Average Testing Time = 0.0233

The process of training indicated that: time was short and error was small. So we could conclude that the ELM could be used to estimate the modal analysis and improve the stability of steady state conditions.

For Java-Bali case, the load changes were given in bus 12. With the simulation steps as in IEEE-14 bus system, participation factor values obtained with the max error was 0.0764.

Average Testing Accuracy = 0.0019  
 Average Training Time = 0.0324  
 Average Testing Time = 0.0030  
 Testing Accuracy = 7.0417e-004  
 Training Time = 0.0313  
 Training Accuracy = 1.1445e-016

TABLE I  
 SAMPLE OF DATA INPUT FOR EXTREME LEARNING MACHINE FOR IEEE 14 BUS' SYSTEM

P1	Q1	V1	...	V2	V3	V6	V8	PL4	QL4	PF9	PF10	PF11	PF14
Real Power G1	Reactive Power G1	Bus Voltage	...	Bus Voltage	Bus Voltage	Bus Voltage	Bus Voltage	Real Power Bus Load	Reactive Power Bus Load	Part. factor bus 9	Part. factor bus 10	Part. Factor bus 11	Part. factor bus 14
1.517	0.308	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	0.967	0.3383	0.1912	0.2319	0.1095	0.327
1.528	0.306	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	0.977	0.338	0.1912	0.2319	0.1095	0.327
1.551	0.314	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	0.997	0.438	0.1914	0.232	0.1094	0.3266
1.564	0.324	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.007	0.538	0.1914	0.2321	0.1094	0.3262
1.679	0.331	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.107	0.738	0.1921	0.2323	0.109	0.3254
1.794	0.326	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.207	0.8383	0.1924	0.2325	0.1089	0.3249
1.91	0.322	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.307	0.9383	0.1927	0.2326	0.1087	0.3243
2.027	0.319	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.407	1.038	0.193	0.2327	0.1085	0.3237
2.145	0.317	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.507	1.138	0.1933	0.2328	0.1083	0.3231
2.265	0.315	1.06	...	1.04	1.01	1.07	1.08	1.607	1.238	0.1936	0.233	0.1081	0.3225

TABLE II  
 SAMPLE OF DATA INPUT FOR EXTREME LEARNING MACHINE FOR JAVA-BALI' SYSTEM

P1	Q1	V1	...	PL12	QL12	PF14	PF19	PF20	PF21
Real Power G1	Reactive Power G1	Bus Voltage G1	...	Real Power Bus Load 12	Reactive Power Bus Load 12	Part. factor bus 14	Part. factor bus 19	Part. Factor bus 20	Part. factor bus 21
3.323	0.957	1.02	...	0.59	0.351	0.0867	0.3688	0.281	0.1657
3.426	0.963	1.02	...	0.69	0.451	0.0868	0.3686	0.281	0.1656
3.529	0.97	1.02	...	0.79	0.551	0.0869	0.3683	0.281	0.1655
3.633	0.978	1.02	...	0.89	0.651	0.087	0.3681	0.2809	0.1654
3.737	0.986	1.02	...	0.99	0.751	0.0871	0.3679	0.2809	0.1653
3.84	0.996	1.02	...	1.09	0.851	0.0873	0.3676	0.2808	0.1652
3.945	1.006	1.02	...	1.19	0.951	0.0874	0.3674	0.2808	0.1651
4.049	1.017	1.02	...	1.29	1.051	0.0875	0.3671	0.2807	0.165
4.154	1.029	1.02	...	1.39	1.151	0.0876	0.3669	0.2807	0.1648
4.259	1.042	1.02	...	1.49	1.251	0.0877	0.3667	0.2806	0.1647
4.364	1.055	1.02	...	1.59	1.351	0.0878	0.3665	0.2805	0.1646
4.47	1.07	1.02	...	1.69	1.451	0.0879	0.3662	0.2804	0.1644
4.576	1.085	1.02	...	1.79	1.551	0.088	0.366	0.2803	0.1643

After going through the training process, ELM was tested using test data. This data were not included in the training process. In the picture, look 4 the ratio of the highest bus participation factor in the IEEE-14 bus system.

The weakest bus is bus 14, followed by bus 10, bus 9 and bus 11 respectively. This value of participation factor will change the value of any change in the load bus.

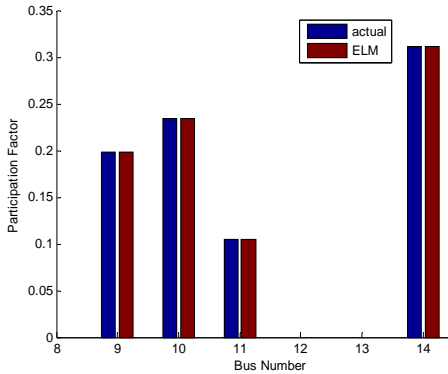


Fig. 5. Comparison of Modal Analysis and ELM Result for IEEE 14 Bus

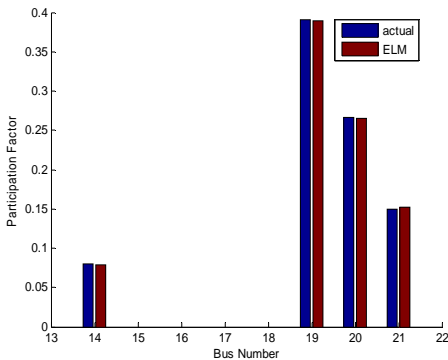


Fig. 6. Comparison of Modal Analysis and ELM Result for Java-Bali

In the Java-Bali system, buses having the largest participation for instability is bus 19 in a row followed by the bus 20, bus 21 and bus 14. Bus 12 (Bandung Selatan) was used as bus load changes. Any change in the load on this bus will affect the change in the value of power generation, the generator terminal voltage, load bus voltage and the bus participation factor. All of these change the value in teaching the ELM.

TABLE III

THE COMPARISON OF DATA TESTING AND ELM RESULTS FOR IEEE 14 BUS SYSTEM

Testing Data PF	Learning PF	Errors
0.1049	0.105	0.003
0.1045	0.1048	0.0101
0.1039	0.1046	0.0244
0.1034	0.1043	0.0495
0.3114	0.3119	0.0007
0.3098	0.3115	0.0025
0.3079	0.3117	0.0052
0.3058	0.3127	0.0105

Actual data values and learning PF data were obtained from the ELM comparison and the error value was obtained as shown in table III and table IV. Of the error, it could be seen that the ELM was very accurate and fast in determining the voltage stability assessment.

TABLE IV  
THE COMPARISON OF DATA TESTING AND ELM RESULTS FOR JAVA-BALI SYSTEM

Testing Data PF	Learning PF	Errors
0.361	0.3621	0.0006
0.3608	0.3651	0.001
0.3605	0.3771	0.0102
0.3603	0.3878	0.0049
0.3601	0.4471	0.0518
0.2764	0.2749	0.0031
0.2761	0.2717	0.0118
0.2758	0.2619	0.0461
0.2755	0.2433	0.0764

## V. Conclusion

In this paper, the estimated result obtained from ELM method showed that this approach was able to predict the voltage stability condition in power system. The result showed that Modal Analysis and ELM had overall error in output values was less 0.07 which would be acceptable and it meant that the ELM method had strong potential to be a useful tool for a voltage stability assessment and suitable for on line steady state stability assessment of power system.

## References

- [1] Savu C.Savulescu. Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Center. *IEEE Press. Wiley.* 2009

- [2] Gao, B., Kundur, P., Morisson, G.K. "Voltage Stability Evaluation Using Modal Analysis", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 7, no. 4, pp. 1423-1543, (November 1992).
- [3] Kundur, P., "Power System Stability and Control", Mc-Graw Hill, New-York, 1994, pp 960-971.
- [4] Ching-Yin Lee, ShaoHong Tsai, Yuan-Kang Wu. A New Approach to The Assessment os Steady-State Voltage Stability Margin Using P-Q-V Curve, *Electrical Power and Energy System*, 2010
- [5] Yang Wang, Wenyuan Li, Jiping Lu, A New Node Voltage Stability Index Based on Local Phasors, *Electrical Power and Energy System*, 79, 265-271, 2009
- [6] M.Moghavveni, M.O. Faruque, Power System Security and Voltage Collapse: A Line Outage Based Indicator for Prediction, *Electrical Power and Energy System*, 1999; 21; pp 455-461
- [7] M.H. Haque. A Fast Method for Determining The Voltage Stability Limit of a Power System. *Electrical Power and Energy System*, 1995; 32; pp.35-43
- [8] B.Jeyasurya, Extreme Learning Machine fo Power System Steady-State Voltage Instability Evaluation. *Electrical Power and Energy System*, 2010, 29, pp.85-90
- [9] ELM Larsson, Alain Germond, Boming Zhang. Application of Neural Networks to the Identification of Steady State Equivalents of External Power Systems, *International Conference On Power System Technology*, Chongqing, October 2006
- [10] C.W. Taylor, D. C. Erickson, K. E. Martin, and V. Venkatasubramanian, "WACS-wide-area stability and voltage control system: R&D and online demonstration," *Proceedings of the IEEE*, May 2005, Vol. 93, No. 5, pp. 892 – 906,
- [11] G. Benmouyal, E.O. Schweitzer, and A. Guzman, "Synchronized Phasor Measurement in Protective Relays for Protection, Control, and Analysis of Electric Power Systems," *Western Protection Relay Conference*, 29 Annual, October 2002
- [12] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Definition and Classification of Power System Stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, May 2004 Vol. 19, No. 2, pp.1387-1401.
- [13] Y.Xu, Z.Y.Dong, K.Meng, R.Zhang, K.P.Wong, Real-time Transient Stability Assessment Model Using Extreme Learning Machine, *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2011, Vol.5, Iss.3, pp.314-322
- [14] Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y., Siew, C.-K.: 'Extreme learning machine: theory and applications', *Neurocomputing*, 2006, 70, pp. 489–501
- [15] Huang, G.-B, Xiaojian Ding, Hongming Zhou, Optimization Method Based Extreme Learning Machine for Classification, *Neurocomputing*, 2010, 74, pp.155-163
- [16] Qin-Yu Zhu, A.K. Qin, P.N. Suganthan, Guang-Bin Huang Evolutionary extreme learning machine, *Pattern Recognition Society*, 2005, 38, pp. 1759 – 1763
- [17] M. Hosseini, Voltage Stability Analysis and Contingency Ranking in Power Systems Using Neural Network, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, October 2010 (part A), Vol. 3. n. 5, pp. 876-881



**Adi Soeprijanto** was born in Indonesia in 1964. He received the Ph.D degree in electrical engineering from Hiroshima University, Japan, in 2001. He is currently a Professor of Department of Electrical Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS). His research interest includes power system dynamic and control applications.



**Ontoseno Penangsang** was born in Indonesia in 1949. He received the Ph.D degree in electrical engineering from University of Wisconsin, USA, in 1983. He is currently a Professor of Department of Electrical Engineering, Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS). His research interest include power system analysis and power quality.

### Authors' information



**Indar Chaerah Gunadin** was born in Indonesia in 1973. He is a lecturer of Hasanuddin University. He received the M.S degree in electrical engineering from Sepuluh Nopember Institute of Technology (ITS), Indonesia, in 2006. He is currently a Doctoral Candidate of Department of Electrical Engineering ITS. His research interest include power system stability, FACTS Device, Artificial Intelligent and control.

## Determination of Steady State Stability Margin Using Extreme Learning Machine

INDAR CHAERAH GUNADIN, MUHAMMAD ABDILLAH,  
ADI SOEPRIJANTO, ONTOSENO PENANGSANG  
Department of Electrical Engineering  
Hasanuddin University - Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Makassar - Surabaya  
INDONESIA

indar09@mhs.ee.its.ac.id,abdillah@elect-eng.its.ac.id, adisup@ee.its.ac.id, zenno\_379@yahoo.com

*Abstract:* - Power systems have increased in size and complexity due to rapid growth of widespread interconnection. This situation will make power system operated closer to steady-state stability limit (SSSL) resulting in higher probability voltage instability or voltage collapse. This paper presents SSSL assessment in power system using Extreme Learning Machine (ELM) model based on REI-Dimo method. The equivalent REI-Dimo is used to determine SSSL index of the power systems. Then, the result of REI-Dimo will be taught on ELM method via online. The results of ELM will compared with Artificial Neural Network (ANN) method. Studies were carried out on a Java-Bali 500kV system. The simulation showed that the proposed method could accurately predict the proximity to SSSL in power system. The proposed method was computationally efficient and suitable for online monitoring of steady-state stability condition in the power systems.

*Key-Words:* - Extreme Learning Machine, ANN, REI-Dimo Equivalent, SSSL, Voltage Collapse

### 1 Introduction

Load growth without a corresponding increase in transmission capacity has brought power systems operate near to steady state stability limit (SSSL). When a power system approaches the SSSL, the voltage of some buses reduces rapidly for small increments in load and the controls or operators may not able to prevent the voltage decay or collapse. Voltage collapse has become an increasing threat to power system security and reliability. To operate the system with an adequate security margin, it is essential to estimate the voltage stability margin corresponding to the given operating point. The main problem here is that the maximum permissible loading of the transmission system is not a fixed quantity. It depends on various factors such as network topology, availability of reactive power support, generation and load patterns etc. All these factors continuously vary with time. Voltage magnitude alone cannot be used as an indicator of instability [1-3].

The steady-state stability limit (SSSL) of a power system is "a steady-state operating condition for which the power system is steady-state stable but an arbitrarily small change in any of the operating quantities in an unfavorable direction causes the power system to lose the stability". An earlier definition refers to this concept as "the stability of

the system under the conditions of gradually or relatively slow changes in the load". Voltage collapse, units getting out of synchronism, and instability caused by self amplifying small-signal oscillations are all forms of steady-state instability [3].

Empirically, the risk of steady-state instability is associated with low real or reactive power reserves, low voltage levels, and large bus voltage variations for small load or generated power changes. Recurring "temporary faults", i.e. where breakers trip without apparent reason and which is disconnected by a protection without being able to identify the fault, might also be an indication of steady-state instability. Breaker trips can happen when loads increase due to "balancing rotors" of generators that are operated near instability trip and then get back in synchronism[1-5].

Equivalent REI (Radial, Equivalent and independent ) has also been used to speed up and simplify the complex computational algorithms. For example, the rigorous solution of the steady-state stability problem is predicated on detailed machine model and entails an alternate sequence of load flow and eigenvalues calculating until the point of instability is found. However, determining eigenvalues for successively deteriorated load-flow cases is computationally intensive and has the

inconvenience that load-flow may not converge near the instability. The use of equivalent in conjunction with appropriate simplifying assumptions is the only way to overcome such difficulties and Dimo's method has been successfully implemented and is currently used in several SCADA/EMS installations to compute the system load ability limits in real-time and to continuously monitor the distance to instability [6]-[7].

A number of special algorithms have been proposed in the literature for steady state stability. However, these methods require large computations and are not efficient enough for on-line or real-time stability assessment. For real-time applications there is a need tools which can quickly detect the point collapse of system and to provide guidance to steer the system away from a developing voltage collapse.

Recently, there has been considerable interest in the application of Extreme Learning Machine (ELM) to power system. ELM has the ability to classify complex relationships properly. The relationships classified by ELM are highly non linear and often result from large mathematical models. Once trained, the ELM can classify new data much faster than it would be possible by solving the model analytically: An integrated based systems, ELM, and conventional power system solution methodologies have potential to provide real-time optimization and control of power system. [8]-[9].

This paper presents the application of ELM to provide fast indication of steady stability limit with the use of REI-Dimo result as training data. For online steady-state stability monitoring, it is essential to identify the maximum power of loading faster calculation so that the ELM method can be a alternative solution.

## 2 Research Method

### 2.1 REI-Dimo Equivalent

Many references that are available describe the approach to steady-state stability assessment developed by Paul Dimo, starting, of course, with the books and papers written by Dimo himself. In order to avoid overlap with already-published material, in this section we just briefly discuss just the key aspects of the technique and emphasize the assumptions that provide computational speed while preserving precision and accuracy. The theoretically oriented reader is directed to review reference [1,6], in which the more subtle aspects of Dimo's methodology are addressed in detail, including the

generalization of Dimo's formulation of the reactive-power steady-state stability criterion.

A power system consists of a linear sub-system, i.e., transmission lines, transformers, reactor, capacitors, and the bus-to-ground admittances to represent line charging and transformer taps; and a non-linear subsystem, i.e., generators, loads and synchronous condensers. Bus can divided into non-essential buses, which are to be eliminated, and essential buses, which are to be retained unchanged[1].

Figure 1, which meets the requirement that the generators be radially connected to a "nodal point" where the load is located. The topology of this network, in spite of its simplicity, reflects a typical radial network of short-circuit impedances (admittances) obtained after applying the short circuit current transformation [1].

The generators  $G_1$  and  $G_2$  the mechanical powers  $P_{m1}$  and  $P_{m2}$  equal the electrical MW generated powers, which are given by equations (1) and (2):

$$P_{m1} = P_1 = \frac{E_1 V}{X_1} \sin \delta_1 \quad (1)$$

$$P_{m2} = P_2 = \frac{E_2 V}{X_2} \sin \delta_2 \quad (2)$$

The generated real powers are entirely absorbed by the load  $P_{load}$ , as shown in equation (3):

$$P_{load} = \frac{E_1 V}{X_1} \sin \delta_1 + \frac{E_2 V}{X_2} \sin \delta_2 = const \quad (3)$$

And the reactive power of the load  $Q_{load}$  is supplied by :

$$Q_{load} = \frac{V^2}{X_{load}} = \frac{E_1 V}{X_1} \cos \delta_1 - \frac{V^2}{X_1} + \frac{E_2 V}{X_2} \cos \delta_2 - \frac{V^2}{X_2} \quad (4)$$

Let us now consider a perturbation  $\Delta Q$  of reactive power injected into the load bus. From(1),(2),(3), and (4) and with  $\Delta P_{m1} = 0$ ,  $\Delta P_{m2} = 0$ ,

$\Delta P_{load} = 0$ , as well as  $\frac{\partial Q_{load}}{\partial \delta_1} = 0$  and

$\frac{\partial Q_{load}}{\partial \delta_2} = 0$  because  $Q_{load}$  is a function of  $V$  only,

we obtain Jacobian matrix of the system [1]:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & 0 \\ \frac{\partial (P_1 + P_2)}{\partial V} & \frac{\partial (P_1 + P_2)}{\partial \delta_1} & \frac{\partial (P_1 + P_2)}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial (Q_1 + Q_2 - Q_{load})}{\partial V} & \frac{\partial (Q_1 + Q_2)}{\partial \delta_1} & \frac{\partial (Q_1 + Q_2)}{\partial \delta_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

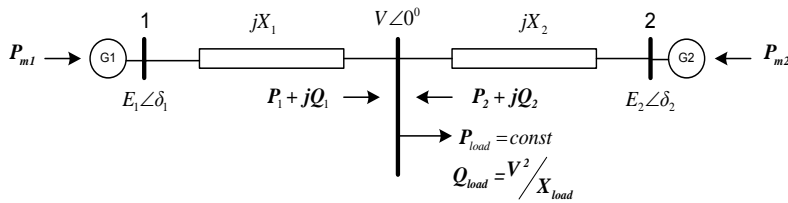


Fig.1 Radial network of generators connected to the nodal point

Then, we obtain the determinant D of Jacobian matrix:

$$D = (I_1 \cos \delta_1)(I_2 \cos \delta_2) V^2 \left( \frac{I_1}{\cos \delta_1} + \frac{I_2}{\cos \delta_2} - 2YV \right) \quad (6)$$

The solution will get if, and only if,  $D \neq 0$ , in which case we obtain

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \frac{I_1}{\cos \delta_1} + \frac{I_2}{\cos \delta_2} - 2YV \quad (7)$$

Paul Dimo has shown that, for system of 1, ..., m generators and synchronous condenser connected radially to a single-load bus (either actual or equivalent) through the admittance  $Y_1, \dots, Y_m, \dots, Y_n$ , the derivative can be computed with formula [1]:

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} - 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{load} \right) V \quad (8)$$

in which:

$E_m$  = internal voltages of the machines (assumed to remain constant, unaffected by small adjustments made under steady-state stability conditions)

$\delta_m$  = internal angles of the machines with reference to the voltage V on the load bus (either fictitious or actual)

V = Voltage in the load center

$Y_{Load}$  = Load center admittance

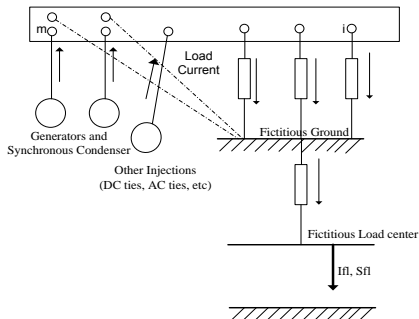


Fig.2 Transition from the meshed power system network to radial scheme

to simplify, the formula in equation (8) will be separated by two components, such as :

$$D = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} \quad \text{and} \quad E = 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{load} \right) V \quad (9)$$

To determine the pattern of economic relations to be represented on the stability index value,  $d\Delta Q/dV$  is determined by changes in the parameters V and  $\cos \delta_m$ . The closer the distance load to the power plant that supplies the value  $\cos \delta_m$ , the greater it will be because the difference of angle bus that sends and receives is smaller. The result will be worth the value of D and E will be smaller and greater value. The small value of D and the greater value of E results in the distance to  $D = E$  or  $d\Delta Q/dV = 0$  which becomes more distant. Therefore, this method can increase the steady-state stability limit [10].

## 2.2 Extreme Learning Machine for Steady State Stability

Conventional methods such as back-propagation (BP) and the method of Levenberg-Marquardt (LM) has been used extensively in training neural networks [17]. Although this algorithm is relatively slow in learning. A new learning method for single-hidden-layer feed forward neural-networks (SLFNs) the so-called extreme learning machine (ELM). In ELM, the input weights and hidden biases are randomly chosen. The output weights obtained using the Moore-Penrose (MP) generalized inverse. ELM has the capability in terms of speed and easier than traditional methods of gradient-based learning algorithms [14-17].

Compared to SVM (Super Vector Machine) and Back-Propagation, ELM has several advantages [15-19]:

- 1) ELM needs much less training time compared to popular BP and SVM.
- 2) The prediction accuracy of ELM is usually slightly better than BP and close to SVM.
- 3) Suitable for almost all nonlinear activation functions.

In ELM, the input weights and hidden biases generated randomly. Furthermore, the nonlinear system has been transformed into a linear system:

$$H\beta = T$$

where as named in Huang et al. [15-19],  $H = \{h_{ij}\}$  ( $i=1, \dots, N$  and  $j=1, \dots, K$ ) is hidden-layer output matrix,  $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_K]^T$  is matrix of output weights and  $T = [t_1, t_2, \dots, t_N]^T$  is matrix of targets.

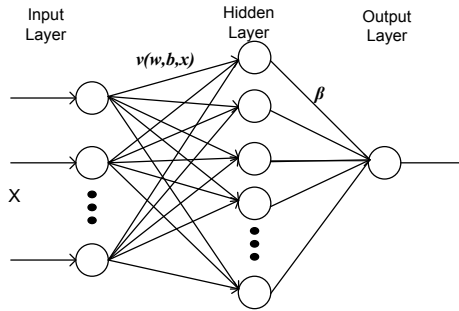


Fig.3 Structure of an SLF-NN

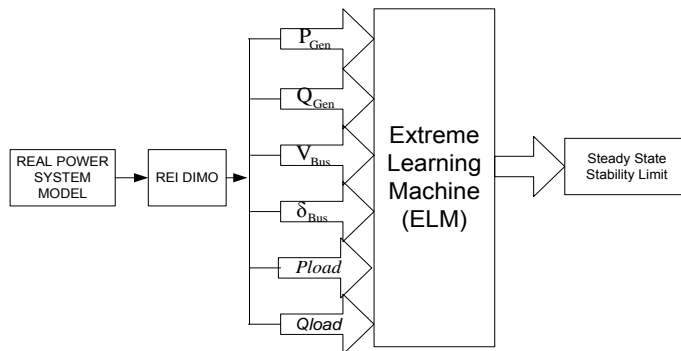


Fig.4 Scheme of research

In this paper, ELM is utilized to map the highly non-linear relationship between network voltage profile of load center from REI-Dimo Equivalent and the corresponding steady-state stability limit of power system. First, the simulation starts with running the power flow program for Java-Bali system. Then, by using REI- Dimo equivalent, the system will be reduced into simple network by reducing all load buses into a representative load center buses. Network voltage profile of reduced model is provided by REI-Dimo.

**2.3 Structure of The Proposed Approach**

Figure 4 shows the structure of the proposed approach. This approach consists of four main. Parts as follows:

1. Reducing the Java-Bali system be a simplify power system using REI- Dimo.
2. Determining the index steady-state stability limit using REI-Dimo
3. Changing the power in the load center to obtain the parameter of system such as: real power and reactive power generation, magnitude and phase of bus voltage, D and E constant, and SSSL index. All data obtained

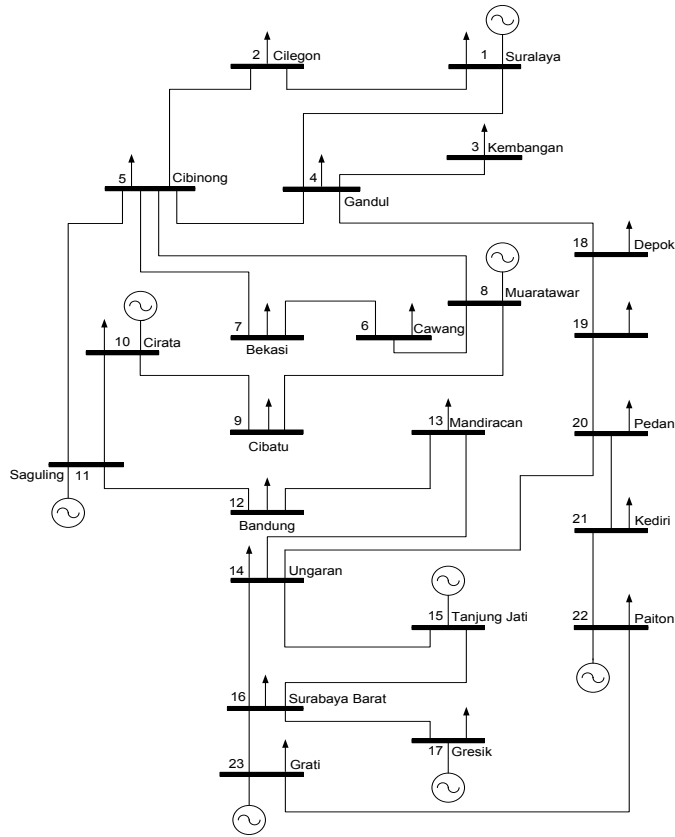


Fig.5 Single Line Diagram of 500 kV Java-Bali Power System

from steps (3) will be used to train, validate and test the ELM

4. Evaluating index SSSL using ELM

### 2.4 Test Power System

The Plant as the case for simulation is the 500 kV Java-Bali Power System as shown in Figure 5. The data of generator characteristics and cost, line impedances and an operating condition are shown at Tables 1-2.

## 3 Result And Analysis

### 3.1 REI-Dimo Equivalent for Java-Bali System

Figure 6, shows the single load REI equivalent of Java Bali system with 8 generator bus and one load centre. The Y bus of equivalent system after Gaussian Elimination and REI-Dimo parameter are given in Table 3 and Table 4.

The Java-Bali system changed into reduced model using REI-Dimo Method. Then using the equation (1), the steady state stability limit of Java-Bali system was obtained. Figure 7 shows the value of SSSL of Java-Bali system using REI-Dimo.

Table 1 Line Data of 500 kV Java-Bali Power System

From Bus	To Bus	R (pu)	X(pu)	B (pu)
1	2	0.000626496	0.007008768	0
1	4	0.006513273	0.062576324	0.01197964
2	5	0.013133324	0.146925792	0.007061141
3	4	0.001513179	0.016928309	0
4	5	0.001246422	0.01197501	0
4	18	0.000694176	0.006669298	0
5	7	0.00444188	0.0426754	0
5	8	0.0062116	0.059678	0
5	11	0.00411138	0.04599504	0.008841946
6	7	0.001973648	0.01896184	0
6	8	0.0056256	0.054048	0
8	9	0.002822059	0.027112954	0
9	10	0.00273996	0.026324191	0
10	11	0.001474728	0.014168458	0
11	12	0.0019578	0.0219024	0
12	13	0.00699098	0.0671659	0.01285827
13	14	0.013478	0.12949	0.024789624
14	15	0.01353392	0.15140736	0.007276522
14	16	0.01579856	0.1517848	0.007264438
14	20	0.00903612	0.0868146	0
15	16	0.037539629	0.360662304	0.017261339
16	17	0.00139468	0.0133994	0
16	23	0.003986382	0.044596656	0
18	19	0.014056	0.157248	0.030228874
19	20	0.015311	0.171288	0.032927881
20	21	0.010291	0.115128	0.022131855
21	22	0.010291	0.115128	0.022131855
22	23	0.004435823	0.049624661	0.009539693

Table 2 Operating Condition

Bus No.	Load		Generation		Injected
	MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	153	45	3332.176	988.564	0
2	703	227	0	0	0
3	760	261	0	0	0
4	544	181	0	0	0
5	697	215	0	0	0
6	760	181	0	0	0
7	646	170	0	0	0
8	0	0	1470	679.361	0
9	823	317	0	0	0
10	680	245	400	484.322	0
11	0	0	535	1043.085	0
12	590	351	0	0	0
13	397	136	0	0	0
14	329	363	0	0	0
15	0	0	830	361.87	0
16	862	317	0	0	0
17	210	91	810	608.616	0
18	0	0	0	0	0
19	277	17	0	0	0
20	524	244	0	0	-158
21	358	206	0	0	-193
22	839	272	2820	895.043	-96
23	130	193	198	395.97	0
Total	10282	4032	10395.18	5456.832	-447

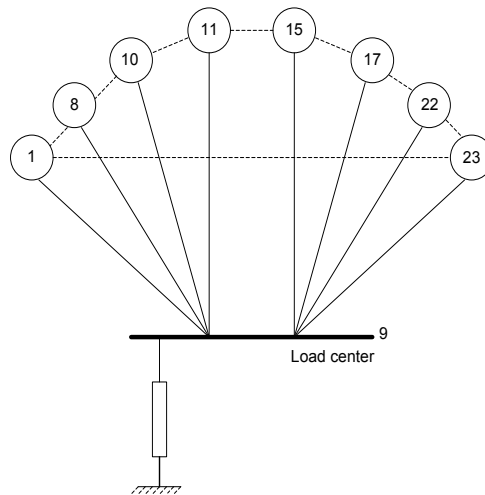


Fig.6 Single Load REI-Dimo of Java Bali System

Table 3 Y Bus of REI-Dimo Single Load Equivalent of Java Bali System

No Gen Bus	Bus 9 (Load Center)
1	-0.2296 - 2.7875i
8	-0.2282 - 2.5303i
10	-0.1732 - 1.8221i
11	0.0657 - 3.0665i
15	0.1065 - 0.6660i
17	0.0144 - 1.6252i
22	-0.0420 - 2.1648i
23	0.1672 - 0.6704i
9	0.3178 +15.2987i

Table 4 REI-Dimo Parameter

No Bus	Y re G (pu)	Y im B (pu)	REI MW	REI MVAr	V (pu)	V ang(°)
1	-.2296	-.7875	3314.2	988.564	1.02	0
8	-.2282	-.5303	1470	679.361	1	-6.241
10	-.1732	-.8221	400	484.322	1	-7.029
11	0.0657	-.0665	535	1043.09	1	-6.663
15	0.1065	-0.666	830	361.87	1	9.938
17	0.0144	-.6252	810	608.616	1	9.735
22	-0.042	-.1648	2820	895.043	1	14.303
23	0.1672	-.6704	198	395.97	1	11.751
9	-0.637	-.0341	10264	4032	0.94	-4.267

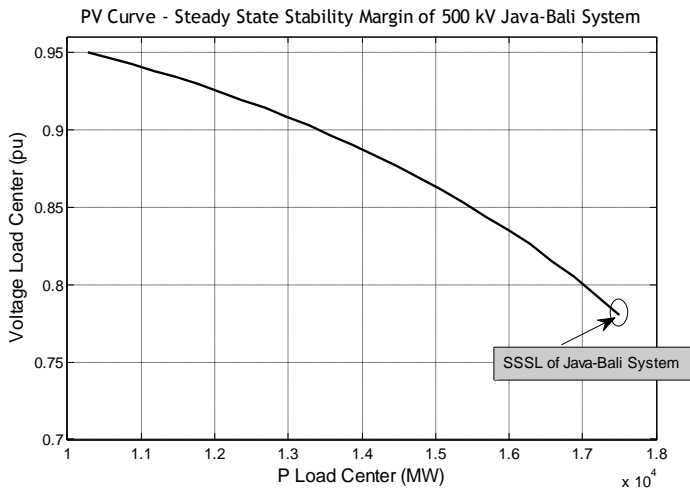


Fig.7 SSSL of Java-Bali System

**3.2 Steady State Stability Using ELM for Java-Bali power system**

All data determined from REI-Dimo such as: active power generation ( $P_{Gen}$ ), reactive power generation ( $Q_{Gen}$ ), voltage of all bus, active load power and

reactive load power will be input data and Voltage in the load center ( $V_{load\ center}$ ), index of SSSL by REI-Dimo equivalent will be output data for ELM method. All data will be trained with 500 hidden neurons, activation function 'sig'.

Using REI-Dimo method, maximum voltage obtained in the load center ( $V_{load(max)}$ ) area is 0.781 (pu) and the SSSL is -1.2376. All data obtained from REI-Dimo will be trained to ELM. Training process

in ELM needs training time is 0.825 s but ANN needs time is 1.56 s, and obtained ( $V_{load(max)}$ ) is 0.781 (pu) and SSSL is -1.2376 with the training error is 0%.

Table 5. A few data that obtained from REI-Dimo

$P_1$	$Q_1$	$V_1$	$\theta_1$	...	$P_{Load}$	$Q_{Load}$	$V_{Load}$	$\theta_{Load}$	D	E	SSSL Index
1657.62	898.594	1.02	0	...	10282	4032	0.95	-26.7	61.07	120.7	-59.657
1905.77	969.249	1.02	0	...	10582	4148.14	0.946	-28.88	61.26	120.6	-59.294
2149.54	1046	1.02	0	...	10882	4265.74	0.942	-31.08	61.46	120.4	-58.895
2388.82	1128.7	1.02	0	...	11182	4383.34	0.938	-33.3	61.69	120.1	-58.458
2623.35	1217.23	1.02	0	...	11482	4500.94	0.934	-35.53	61.94	119.9	-57.98
2852.83	1311.47	1.02	0	...	11782	4618.54	0.929	-37.78	62.22	119.7	-57.456
3076.92	1411.29	1.02	0	...	12082	4736.14	0.924	-40.05	62.53	119.4	-56.883

The proposed ELM architecture can have 50 input nodes and 2 output nodes and only one hidden layer is used. Sigmoid types of additive hidden nodes are used in this ELM.

In this paper, the performance of ELM will compare with Artificial Neural Network result. Fig.8 and Fig.9 shown the result of ELM training for both parameter, i.e. SSSL index and Voltage of Load Centre.

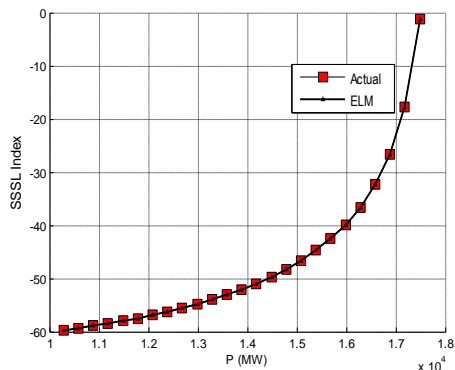


Figure 8. SSSL Index of ELM Training

After training and testing SSSELM, it is used in the working mode of the proposed algorithm as

shown in Table 6. In this mode, for any given operating point of power system by parameter measurement of bus voltages, voltage magnitudes and phase angles are extracted as input data to estimate SSSL by SSSELM.

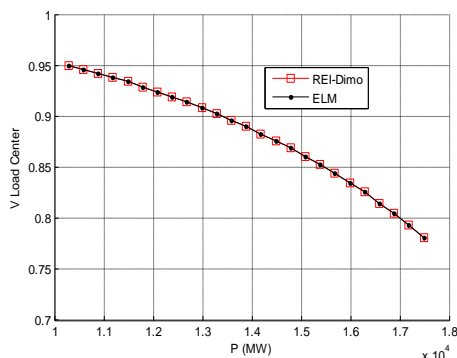


Figure 9. Voltage of Load Centre of ELM Training

As a case study, for an operating point with load center is 10640 MW and 4100.32 MVAR, the value of SSSL in Eq. (1) is taken as -59.4459 and two scenarios are studied in which all load center are supposed to be changed with 250 MW and 98 MVAR. Tables 7-8 show the result of load center change from 10460 MW to 11460 MW and 4100.32

MVAR to 4492.32 MVAR and load center voltage change from 0.948 (pu) to 0.934 (pu). The overall error in the output values for the given example is less than 0.23% which will be acceptable and the method has strong potential for steady state stability assessment. Tables 7 and 8 shows that the results of ELM method is more accurate than the ANN method. The table 7 shows that the maximum

testing absolute errors of SSSL for ELM method are: 0.06%, 0.17%, 0.1%, 0.23%, and 0.03%. Similarly, the maximum testing errors for ANN are: 0.45%, 0.32%, 0.24%, 0.19% and 0.57%. From these results, it can be seen that ELM has the less error level then ANN. The ELM is efficient for the prediction of the steady state stability limit in power system.

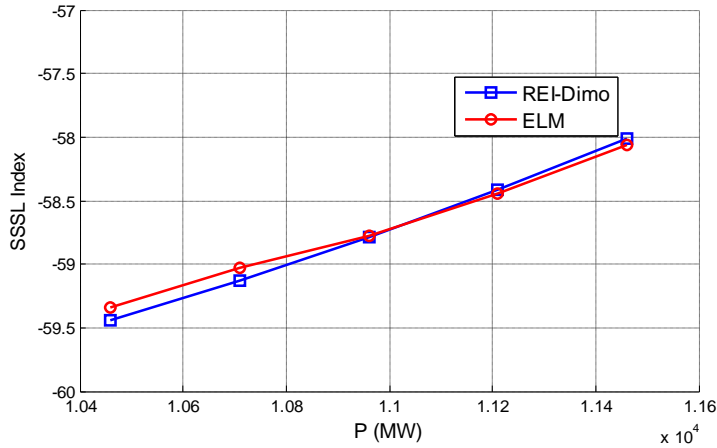


Fig. 10 Comparison of SSSL index between the Actual Data and Testing Results of ELM

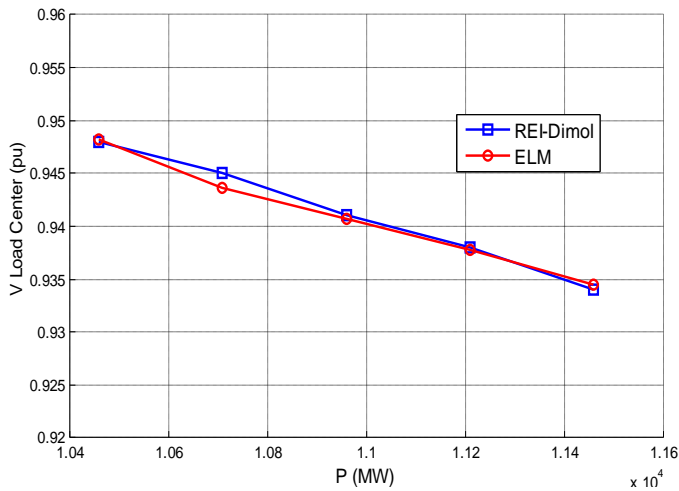


Fig.11 Comparison of Voltage of Load Centre between the Actual Data and Testing Results of ELM

Table 6. A few of Data Testing from REI-Dimo

P Load Center (MW)	Q Load Center (MVAR)	V Load Center (pu)	$\theta$ Load Center (degree)	D	E	SSSL Index
10460	4100.32	0.948	-27.993	61.1773	120.6233	-59.4459
10710	4198.32	0.945	-29.819	61.342	120.47	-59.128
10960	4296.32	0.941	-31.656	61.521	120.31	-58.785
11210	4394.32	0.938	-33.504	61.714	120.13	-58.415
11460	4492.32	0.934	-35.365	61.924	119.94	-58.016

Table 7. The Comparison of Data Testing and Target for Index of SSSL

No. Data	Target	Testing		Error	
		ANN	ELM	ANN	ELM
1	-59.4459	-59.1794	-59.413	0.0045	0.0006
2	-59.128	-58.9366	-59.2311	0.0032	0.0017
3	-58.785	-58.6467	-58.7239	0.0024	0.001
4	-58.415	-58.3024	-58.2782	0.0019	0.0023
5	-58.016	-58.3482	-58.0314	0.0057	0.0003

Table 8. The Comparison of Data Testing and Target for Voltage of Load Center

No. Data	Target	Testing		Error	
		ANN	ELM	ANN	ELM
1	0.948	0.9457	0.9478	0.0024	0.0003
2	0.945	0.9428	0.9445	0.0023	0.0005
3	0.941	0.9398	0.9409	0.0013	0.0001
4	0.938	0.9366	0.9361	0.0015	0.0021
5	0.934	0.9364	0.9344	0.0025	0.0004

#### 4 Conclusion

The estimated results obtained from ELM showed that this technique is able to predict the steady-state stability limit with a reasonable degree of accuracy and more accurate than ANN. Since ELMs had high computation rates, parallel distributed processing, fault tolerance, and adaptive capability, they were excellent alternatives for real-time application combined with REI-Dimo method. The result showed that REI-Dimo and ELM had overall error in the output values was less than 0.23% which would be acceptable and it meant that the SSELML method had strong potential for steady-state stability assessment. And by considering the training time

and accuracy of the networks, it could be safely concluded that SSELML was well-suited for online steady-state stability assessment of power systems.

#### Acknowledgments

The authors acknowledge the financial assistance granted by JBIC (*Japan Bank for International Cooperation*) loan in support of this research project.

#### References:

- [1] Savu C.Savulescu. Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Center. *IEEE Press. Wiley*. 2009

- [2] Cornel Aldea, Savu C.Savulescu, Evaluation Of The Stability Reserve Of Transelectrica's Transmission System By Using Quickstab Professional, *National Conference of Energy CNE*, 2004
- [3] Ching-Yin Lee, ShaoHong Tsai, Yuan-Kang Wu. A New Approach to The Assessment os Steady-State Voltage Stability Margin Using P-Q-V Curve, *Electrical Power and Energy System*. 2010
- [4] Yang Wang, Wenyuan Li, Jiping Lu, A New Node Voltage Stability Index Based on Local Phasors, *Electrical Power and Energy System*. 2009; 79; 265-271
- [5] M.Moghavveni, M.O. Faruque, Power Systm Security and Voltage Collapse: A Line Outage Based Indicator for Prediction, *Electrical Power and Energy System*, 1999; 21; pp 455-461
- [6] M.H. Haque. A Fast Method for Determining The Voltage Stability Limit of a Power System. *Electrical Power and Energy System*, 1995; 32; pp.35-43
- [7] Savu C. Savulescu, Solving Open Access Transmission And Security Analysis Problem with The Short-Circuit Current Method, Latin America Power Conference, Mexico,2002, Pp. 1-5
- [8] B.Jeyasurya, Extreme Learning Machine fo Power System Steady-State Voltage Instability Evaluation. *Electrical Power and Energy System*, 2010, 29, pp.85-90
- [9] Larsson, Alain Germond, Boming Zhang. Application of Neural Networks to the Identification of Steady State Equivalents of External Power Systems, *International Conference On Power System Technology*,Chongqing, October 2006
- [10] Savu C. Savulescu. Equivalent For Security Analysis of Power System, *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, 1981, 100(5) , pp.2672-2682
- [11] C.W. Taylor, D. C. Erickson, K. E. Martin, and V. Venkatasubramanian, "WACS-wide-area stability and voltage control system: R&D and online demonstration," *Proceedings of the IEEE*, May 2005, Vol. 93, No. 5, pp. 892 – 906,
- [12] G. Benmouyal, E.O. Schweitzer, and A. Guzman, "Synchronized Phasor Measurement in Protective Relays for Protection, Control, and Analysis of Electric Power Systems," *Western Protection Relay Conference*, 29 Annual, October 2002
- [13] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, Definition and Classification of Power System Stability, *IEEE Transactions on Power Systems*, May 2004Vol. 19, No. 2, pp.1387-1401.
- [14] Y.Xu, Z.Y.Dong, K.Meng, R.Zhang, K.P.Wong, Real-time Transient Stability Assessment Model Using Extreme Learning Machine, *IET Gener. Transm. Distrb.*, 2011, Vol.5, Iss.3, pp.314-322
- [15] Huang, G.-B., Zhu, Q.-Y., Siew, C.-K.: 'Extreme learning machine: theory and applications', *Neurocomputing*, 2006, 70, pp. 489–501
- [16] Huang, G.-B, Xiaojian Ding, Hongming Zhou, Optimization Method Based Extreme Learning Machine for Classification, *Neurocomputing*, 2010, 74, pp.155-163
- [17] Qin-Yu Zhu, A.K. Qin, P.N. Suganthan, Guang-Bin Huang Evolutionary extreme learning machine, *Pattern Recognition Society*, 2005, 38, pp. 1759 – 1763
- [18] G.-B. Huang, et al., "Universal Approximation Using Incremental Networks with Random Hidden Computational Nodes", *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 17, no. 4, pp. 879-892, 2006
- [19] Guang-Bin Huang, Hongming Zhou, Xiaojian Ding, and Rui Zhang, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, Vol. 42, No. 2, April 2012

## Steady-State Stability Assessment Using Neural Network Based on Network Equivalent

Indar Chaerah Gunadin<sup>\*1</sup>, Muhammad Abdillah<sup>2</sup>, Adi Soeprijanto<sup>2</sup>, Ontoseno Penangsang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Universitas Hasanuddin, Makasar, Indonesia

<sup>2</sup>Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

e-mail: indar09@mhs.ee.its.ac.id<sup>1</sup>, abdillah@elect-eng.its.ac.id<sup>2</sup>, adisup@ee.its.ac.id<sup>3</sup>,  
ontoseno@yahoo.com<sup>4</sup>

### Abstrak

Sistem tenaga di seluruh dunia mengalami peningkatan pada ukuran dan kompleksitas yang diakibatkan oleh pengembangan sistem interkoneksi secara luas. Situasi ini akan membawa sistem tenaga lebih sering beroperasi mendekati batas kestabilan steady-state yang berakibat pada peningkatan ketidakstabilan tegangan atau voltage collapse. Paper ini menjelaskan perbaikan Steady-state Stability Limit (SSSL) pada sistem tenaga menggunakan kombinasi metode REI-Dimo dan Artificial Neural Network (ANN). REI-Dimo equivalent digunakan untuk memperoleh indeks SSSL pada sistem tenaga. Selanjutnya hasil dari REI-Dimo akan diajarkan pada metode ANN secara on-line. Studi ini dilakukan pada sistem Jawa-Bali 500kV. Dari simulasi terlihat bahwa metode yang diusulkan dapat memprediksi SSSL pada sistem tenaga secara akurat. Metode melakukan perhitungan lebih efisien dan cocok digunakan untuk memonitor secara on-line kondisi kestabilan steady-state pada sistem tenaga.

**Kata kunci:** neural network, REI-Dimo, steady-state stability limit, voltage collapse

### Abstract

Power systems in all over the world have increased in size and complexity due to rapid growth of widespread interconnection. This situation will make power system operated closer to steady-state stability limit (SSSL) resulting in higher probability voltage instability or voltage collapse. This paper presents SSSL assessment in power system using Artificial Neural Network (ANN) model based on REI-Dimo method. The equivalent REI-Dimo is used to determine SSSL index of the power systems. Then, the result of REI-Dimo will be taught on ANN method via online. Studies were carried out on a Java-Bali 500kV system. The simulation showed that the proposed method could accurately predict the proximity to SSSL in power system. The method was computationally efficient and suitable for online monitoring of steady-state stability condition in the power systems.

**Keywords:** neural network, REI-Dimo, steady-state stability limit, voltage collapse

### 1. Introduction

The growth of widely-opened transmission access has a significant side effect for modern utilities. Transmission system must accommodate real power transfers that can be quite different from those whose transmission networks are originally planned. The conditions as: parallel flows, network loadings and low bus voltages may be caused by energy transaction across multi area systems of continental or sub continental size. Under such deteriorated operating conditions, unstable conditions or blackouts due to instability which becomes possible if a major disturbance occurs in system, or if a large amount of real power is transferred across a stability of constrained transmission corridor, or even if an insignificant topology change, such as a minor line trip, happens in a system already operated near its maximum load ability limit [1].

Power systems in the modern competitive electric market have increased in size and complexity due to the rapid growth of widespread interconnection. More efficient use of transmission network has already led to situation in which many power systems are operated much longer and closer to steady-state stability limit resulting in a higher probability of collapse [2].

The steady-state stability limit (SSSL) of a power system is "a steady-state operating condition for which the power system is steady-state stable but an arbitrarily small change in any of the operating quantities in an unfavorable direction causes the power system to lose the stability". An earlier definition refers to this concept as "the stability of the system under the conditions of gradually or relatively slow changes in the load". Voltage collapse, units getting out of synchronism, and instability caused by self-amplifying small-signal oscillations are all forms of steady-state instability [3].

Empirically, the risk of steady-state instability is associated with low real or reactive power reserves, low voltage levels, and large bus voltage variations for small load or generated power changes. Recurring "temporary faults", i.e. where breakers trip without apparent reason and which is disconnected by a protection without being able to identify the fault, might also be an indication of steady-state instability. Breaker trips can happen when loads increase due to "balancing rotors" of generators that are operated near instability trip and then get back in synchronism[1]-[7].

Equivalent REI (Radial, Equivalent and Independent) has also been used to speed up and simplify the complex computational algorithms. For example, the rigorous solution of the steady-state stability problem is predicated on detailed machine model and entails an alternate sequence of load flow and eigenvalues calculating until the point of instability is found. However, determining eigenvalues for successively deteriorated load-flow cases is computationally intensive and has the inconvenience that load-flow may not converge near the instability. The use of equivalent in conjunction with appropriate simplifying assumptions is the only way to overcome such difficulties and Dimo's method has been successfully implemented and is currently used in several SCADA/EMS installations to compute the system load ability limits in real-time and to continuously monitor the distance to instability [8]-[9].

Recently, there has been considerable interest in the application of Artificial Neural Network (ANN) to power system [10-14]. ANN has the ability to classify complex relationships properly. The relationships classified by ANN are highly non-linear and often result from large mathematical models. Once trained, the ANN can classify new data much faster than it would be possible by solving the model analytically. An integrated based systems, ANN, and conventional power system solution methodologies have potential to provide real-time optimization and control of power system [10]-[11].

This paper presents the application of ANN to provide fast indication of steady stability limit with the use of REI-Dimo result as training data. For online steady-state stability monitoring, it is essential to identify the maximum power of loading faster calculation so that the ANN method can be an alternative solution.

## 2. Research Method

### 2.1. REI-Dimo Approach For Steady-State Stability Assessment

Many references that are available describe the approach to steady-state stability assessment developed by Paul Dimo, starting, of course, with the books and papers written by Dimo himself. In order to avoid overlap with already-published material, in this section we just briefly discuss just the key aspects of the technique and emphasize the assumptions that provide computational speed while preserving precision and accuracy. The theoretically oriented reader is directed to review reference [1,6], in which the more subtle aspects of Dimo's methodology are addressed in detail, including the generalization of Dimo's formulation of the reactive-power steady-state stability criterion.

A power system consists of a linear sub-system, i.e., transmission lines, transformers, reactor, capacitors, and the bus-to-ground admittances to represent line charging and transformer taps; and a non-linear subsystem, i.e., generators, loads and synchronous condensers. Bus can be divided into non-essential buses, which are to be eliminated, and essential buses, which are to be retained unchanged[1].

Figure 1, which meets the requirement that the generators be radially connected to a "nodal point" where the load is located. The topology of this network, in spite of its simplicity, reflects a typical radial network of short-circuit impedances (admittances) obtained after applying the short circuit current transformation [1].

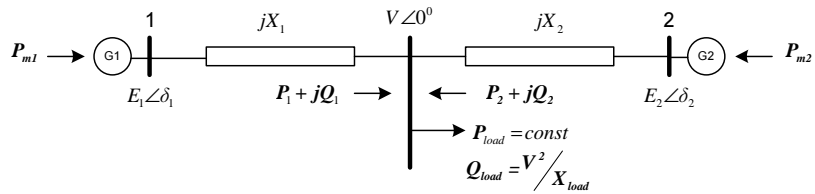


Figure 1. Radial network of generators connected to the nodal point

The generators  $G_1$  and  $G_2$  the mechanical powers  $P_{m1}$  and  $P_{m2}$  equal the electrical MW generated powers, which are given by equations (1) and (2):

$$P_{m1} = P_1 = \frac{E_1 V}{X_1} \sin \delta_1 \quad (1)$$

$$P_{m2} = P_2 = \frac{E_2 V}{X_2} \sin \delta_2 \quad (2)$$

The generated real powers are entirely absorbed by the load  $P_{load}$ , as shown in equation (3):

$$P_{load} = \frac{E_1 V}{X_1} \sin \delta_1 + \frac{E_2 V}{X_2} \sin \delta_2 = const \quad (3)$$

And the reactive power of the load  $Q_{load}$  is supplied by:

$$Q_{load} = \frac{V^2}{X_{load}} = \frac{E_1 V}{X_1} \cos \delta_1 - \frac{V^2}{X_1} + \frac{E_2 V}{X_2} \cos \delta_2 - \frac{V^2}{X_2} \quad (4)$$

Let us now consider a perturbation  $\Delta Q$  of reactive power injected into the load bus. From (1), (2), (3), and (4) and with  $\Delta P_{m1} = 0$ ,  $\Delta P_{m2} = 0$ ,  $\Delta P_{load} = 0$ , as well as  $\frac{\partial Q_{load}}{\partial \delta_1} = 0$  and  $\frac{\partial Q_{load}}{\partial \delta_2} = 0$  because  $Q_{load}$  is a function of  $V$  only, we obtain Jacobian matrix of the system [1]:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial V} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & 0 \\ \frac{\partial (P_1 + P_2)}{\partial V} & \frac{\partial (P_1 + P_2)}{\partial \delta_1} & \frac{\partial (P_1 + P_2)}{\partial \delta_2} \\ \frac{\partial (Q_1 + Q_2 - Q_{load})}{\partial V} & \frac{\partial (Q_1 + Q_2)}{\partial \delta_1} & \frac{\partial (Q_1 + Q_2)}{\partial \delta_2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Then, we obtain the determinant  $D$  of Jacobian matrix:

$$D = (I_1 \cos \delta_1)(I_2 \cos \delta_2) V^2 \left( \frac{I_1}{\cos \delta_1} + \frac{I_2}{\cos \delta_2} - 2YV \right) \quad (6)$$

The solution will get if, and only if,  $D \neq 0$ , in which case we obtain

$$\frac{d\Delta Q}{d\Delta V} = \frac{I_1}{\cos \delta_1} + \frac{I_2}{\cos \delta_2} - 2YV \quad (7)$$

Paul Dimo has shown that, for system of 1,..., m generators and synchronous condenser connected radially to a single-load bus (either actual or equivalent) through the admittance  $Y_1, \dots, Y_i, \dots, Y_m$ , the derivative can be computed with formula [1]:

$$\frac{d\Delta Q}{dV} = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} - 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{load} \right) V \quad (8)$$

in which:

$E_{m_i}$  = internal voltages of the machines (assumed to remain constant, unaffected by small adjustments made under steady-state stability conditions)

$\delta_{m_i}$  = internal angles of the machines with reference to the voltage  $V$  on the load bus (either fictitious or actual)

$V$  = Voltage in the load center

$Y_{Load}$  = Load center admittance

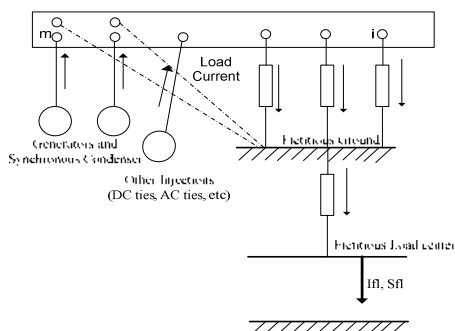


Figure 2. Transition from the meshed power system network to radial scheme

to simplify, the formula in equation (8) will be separated by two component, such as:

$$D = \sum_m \frac{Y_m E_m}{\cos \delta_m} \quad \text{and} \quad E = 2 \left( \sum_m Y_m + Y_{load} \right) V \quad (9)$$

To determine the pattern of economic relations to be represented on the stability index value,  $d\Delta Q/dV$  is determined by changes in the parameters  $V$  and  $\cos \delta_m$ . The closer the distance load to the power plant that supplies the value  $\cos \delta_m$ , the greater it will be because the difference of angle bus that sends and receives is smaller. The result will be worth the value of  $D$  and  $E$  will be smaller and greater value. The small value of  $D$  and the greater value of  $E$  results in the distance to  $D = E$  or  $d\Delta Q/dV = 0$  which becomes more distant. Therefore, this method can increase the steady-state stability limit [15].

## 2.2. Neural Network Algorithm

In the backpropagation algorithms, the desired and actual output of the neural network aims to adjust the network's weights in order to reduce the learning error. Specifically, a typical backpropagation algorithm consists of two passes: in the forward pass, the input vectors are presented to the network, and the actual outputs of the network are calculated. Then, the error between the actual and desired outputs is calculated. In the reverse pass, the error gradient with respect to the network's weights is calculated by propagating the error backwards through

the network. Once the error gradient is calculated, the weights are adjusted by using, for example, a descent gradient method.

In this paper, a backpropagation neural network is utilized to map the highly non-linear relationship between network voltage profile of load center from REI-Dimo Equivalent and the corresponding steady-state stability limit of power system. First, the simulation starts with running the power flow program for Java-Bali system. Then, by using REI- Dimo equivalent, the system will be reduced into simple network by reducing all load buses into a representative load center buses. Network voltage profile of reduced model is provided by REI-Dimo.

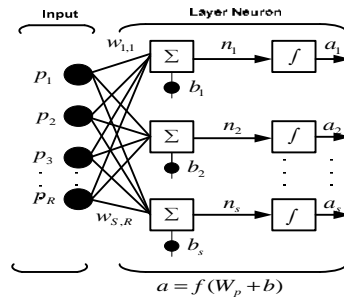


Figure 3. Architecture of ANN

The input pattern of steady-state stability is assessed by neural network (SSSANN). The number of input neurons of SSSANN is determined based on the size of the reduced model that obtained from REI-Dimo. There two output neurons which give the estimated SSSL. The number of hidden neurons is determined based on the trial and error. Generally, one of the drawbacks of neural network application in power system problems depends on its training on the power and load center voltage. Therefore, this dependency necessitates updating the training process in the case of any change in network parameter due to the increase of load center power. The input pattern of the proposed SSSANN is selected in such ways to obtain the representative of system. Therefore, in the case of load power change, network voltage profile, including the effect of network topology, load generation pattern, and reactive power compensation, remains as representative of system stability.

### 2.3 Structure of The Proposed Approach

Figure 4 shows the structure of the proposed approach. This approach consists of four main.

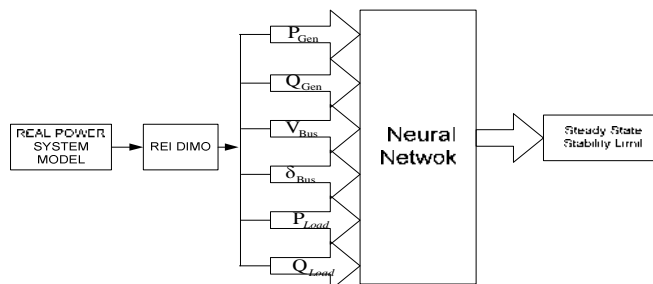


Figure 4. Scheme of research

The parts of the structure of the proposed approach are as follows: reducing the Java-Bali system to a simplified power system using REI-Dimo; determining the index steady-state stability limit using REI-Dimo; changing the power in the load center to obtain the parameter of system such as: real power and reactive power generation, magnitude and phase of bus voltage, D and E constant, and SSSL index. All data obtained from steps (3) will be used to train, validate and test the ANN; and evaluating index SSSL using ANN

Table 1. Line Data of 500 kV Java-Bali Power System

From Bus	To Bus	R (pu)	X(pu)	B (pu)
1	2	0,000626496	0,007008768	0
1	4	0,006513273	0,062576324	0,01197964
2	5	0,013133324	0,146925792	0,007061141
3	4	0,001513179	0,016928309	0
4	5	0,001246422	0,01197501	0
4	18	0,000694176	0,006669298	0
5	7	0,00444188	0,0426754	0
5	8	0,0062116	0,059678	0
5	11	0,00411138	0,04599504	0,008841946
6	7	0,001973648	0,01896184	0
6	8	0,0056256	0,054048	0
8	9	0,002822059	0,027112954	0
9	10	0,00273996	0,026324191	0
10	11	0,001474728	0,014168458	0
11	12	0,0019578	0,0219024	0
12	13	0,00699098	0,0671659	0,01285827
13	14	0,013478	0,12949	0,024789624
14	15	0,01353392	0,15140736	0,007276522
14	16	0,01579856	0,1517848	0,007264438
14	20	0,00903612	0,0868146	0
15	16	0,037539629	0,360662304	0,017261339
16	17	0,00139468	0,0133994	0
16	23	0,003986382	0,044596656	0
18	19	0,014056	0,157248	0,030228874
19	20	0,015311	0,171288	0,032927881
20	21	0,010291	0,115128	0,022131855
21	22	0,010291	0,115128	0,022131855
22	23	0,004435823	0,049624661	0,009539693

Table 2. Operating Condition

Bus No.	Load		Generation		Injected Mvar
	MW	Mvar	MW	Mvar	
1	153	45	3332.176	988.564	0
2	703	227	0	0	0
3	760	261	0	0	0
4	544	181	0	0	0
5	697	215	0	0	0
6	760	181	0	0	0
7	646	170	0	0	0
8	0	0	1470	679.361	0
9	823	317	0	0	0
10	680	245	400	484.322	0
11	0	0	535	1043.085	0
12	590	351	0	0	0
13	397	136	0	0	0
14	329	363	0	0	0
15	0	0	830	361.87	0
16	862	317	0	0	0
17	210	91	810	608.616	0
18	0	0	0	0	0
19	277	17	0	0	0
20	524	244	0	0	-158
21	358	206	0	0	-193
22	839	272	2820	895.043	-96
23	130	193	198	395.97	0
Total	10282	4032	10395.18	5456.832	-447

### 2.4. Test Power System

The Plant as the case for simulation is the 500 kV Java-Bali Power System as shown in Figure 5. The data of generator characteristics and cost, line impedances and an operating condition are shown at Tables 1-2.

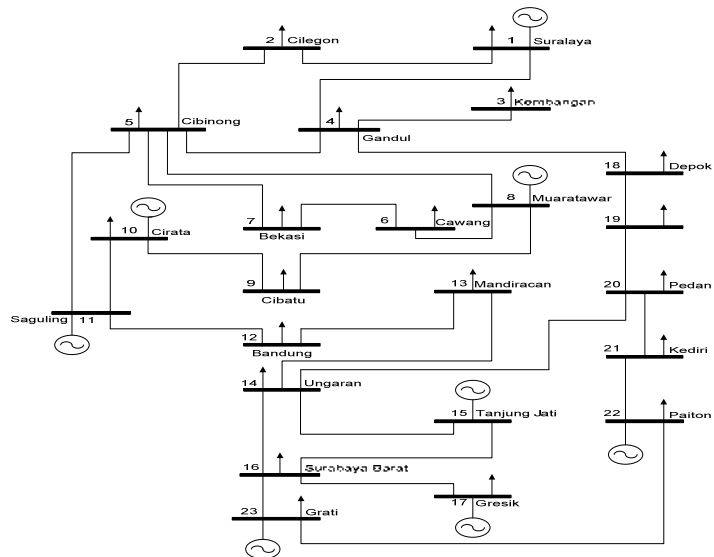


Figure 5. Single Line Diagram of 500 kV Java-Bali Power System

## 3. Results and Analysis

### 3.1 REI-Dimo Equivalent for Java-Bali System

Figure 6, shows the single load REI equivalent of Java Bali system with 8 generator bus and one load centre. The Y bus of equivalent system after Gaussian Elimination and REI-Dimo parameter are given in Table 3 and Table 4.

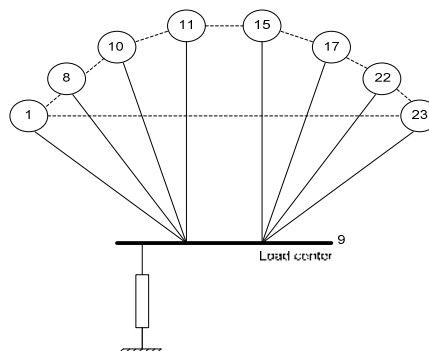


Figure 6. Single Load REI-Dimo of Java Bali System

Table 3. Y Bus of REI-Dimo Single Load Equivalent of Java Bali System

No Gen Bus	Bus 9 (Load Center)
1	-0.2296 - 2.7875i
8	-0.2282 - 2.5303i
10	-0.1732 - 1.8221i
11	0.0657 - 3.0665i
15	0.1065 - 0.6660i
17	0.0144 - 1.6252i
22	-0.0420 - 2.1648i
23	0.1672 - 0.6704i
9	0.3178 +15.2987i

Table 4. REI-Dimo Parameter

No Bus	Y re G (pu)	Y im B (pu)	REI MW	REI MVAR	V (pu)	V ang(°)
1	-0.2296	-.7875	3314.2	988.564	1.02	0
8	-0.2282	-.5303	1470	679.361	1	-6.241
10	-0.1732	-.8221	400	484.322	1	-7.029
11	0.0657	-.0665	535	1043.09	1	-6.663
15	0.1065	-0.666	830	361.87	1	9.938
17	0.0144	-.6252	810	608.616	1	9.735
22	-0.042	-.1648	2820	895.043	1	14.303
23	0.1672	-.6704	198	395.97	1	11.751
9	-0.637	-.0341	10264	4032	0.94	-4.267

The Java-Bali system changed into reduced model using REI-Dimo Method. Then using the equation (1), the steady-state stability limit of Java-Bali system was obtained. Figure 7 shows the value of SSSL of Java-Bali system using REI-Dimo.

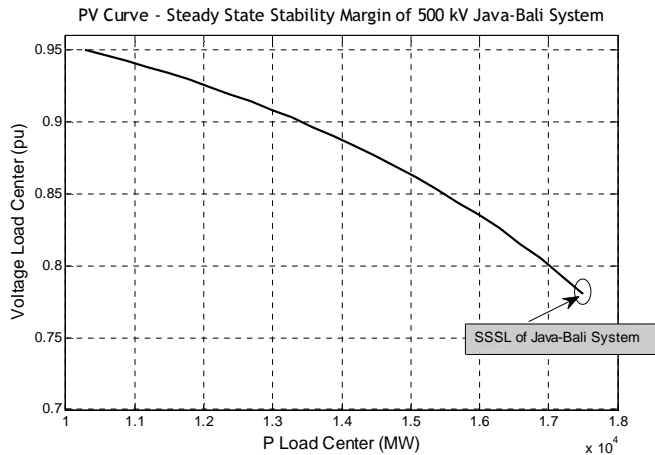


Figure 7. SSSL of Java-Bali System

### 3.2 Steady-state Stability Using ANN for Java-Bali power system

All data determined from REI-Dimo such as: active power generation ( $P_{Gen}$ ), reactive power generation ( $Q_{Gen}$ ), voltage of all bus, active load power and reactive load power will be input data and Voltage in the load center ( $V_{load\ center}$ ), index of SSSL by REI-Dimo equivalent will be output data for ANN method. All data will be trained using backpropagation method with 5 layer neurons and 2 outputs.

Table 5. A few data that obtained from REI-Dimo

$P_1$	$Q_1$	$V_1$	$\Theta_1$	...	$P_{Load}$	$Q_{Load}$	$V_{Load}$	$\Theta_{Load}$	D	E	SSSL Index
1657.62	898.594	1.02	0	...	10282	4032	0.95	-26.7	61.07	120.7	-59.657
1905.77	969.249	1.02	0	...	10582	4148.14	0.946	-28.88	61.26	120.6	-59.294
2149.54	1046	1.02	0	...	10882	4265.74	0.942	-31.08	61.46	120.4	-58.895
2388.82	1128.7	1.02	0	...	11182	4383.34	0.938	-33.3	61.69	120.1	-58.458
2623.35	1217.23	1.02	0	...	11482	4500.94	0.934	-35.53	61.94	119.9	-57.98
2852.83	1311.47	1.02	0	...	11782	4618.54	0.929	-37.78	62.22	119.7	-57.456
3076.92	1411.29	1.02	0	...	12082	4736.14	0.924	-40.05	62.53	119.4	-56.883

Using REI-Dimo method, maximum voltage obtained in the load center ( $V_{load(max)}$ ) area is 0.781 (pu) and the SSSL is -1.2376. All data obtained from REI-Dimo will be trained to ANN. Training process in NN needs epoch is 10, and obtained ( $V_{load(max)}$ ) is 0.7807 (pu) and SSSL is 1.3111.

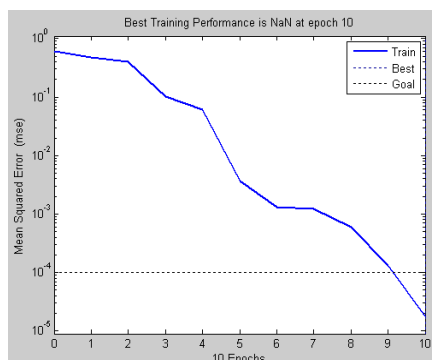


Figure 8. Training Performance

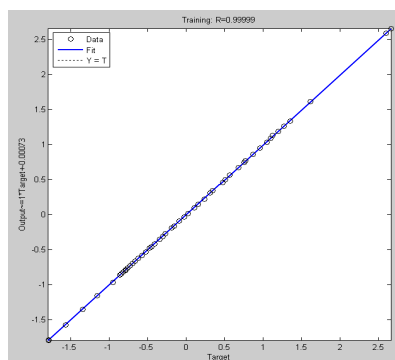


Figure 9. Regression Plot

To illustrate the effectiveness of the proposed ANN steady stability limit, the Java-Bali power system, shown in Figure 8 dan Figure 9, is considered. In addition to training, validating and testing errors, another post-training analysis denoted as a regression analysis has been performed, relating SSSANN response to the actual values to investigate the performance of the trained SSSANN. For this purpose, linear regression between SSSANN outputs and exact values is used to determine the accuracy of SSSANN. In table 6, the outputs of SSSANN are compare with the exact values that, while its  $V_{load(max)}$  errors and SSSL errors are about 0.00038 and 0.05 respectively which are indicating good performance of SSSANN. Figure 10 and 11 show the estimated SSSL by SSSANN compared to the exact value of REI-Dimo method.

After training and testing SSSANN, it is used in the working mode of the proposed algorithm as shown in Table 7. In this mode, for any given operating point of power system by parameter measurement of bus voltages, voltage magnitudes and phase angles are extracted as input data to estimate SSSL by SSSANN.

As a case study, for an operating point with load center is 10640 MW and 4100.32 MVAR, the value of SSSL in Eq. (1) is taken as -59.4459 and two scenarios are studied in which all load center are supposed to be changed with 250 MW and 98 MVAR. Tables 8-9 show the result of load center change from 10460 MW to 11460 MW and 4100.32 MVAR to 4492.32 MVAR and load center voltage change from 0.948 (pu) to 0.934 (pu). The overall error in the output values for the given example is less than 0.5% which will be acceptable and the method has strong potential for steady-state stability assessment.

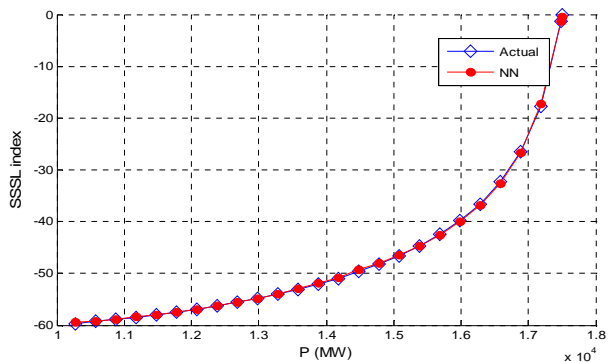


Figure 10. Comparison P vs Stability Index between REI-Dimo and ANN

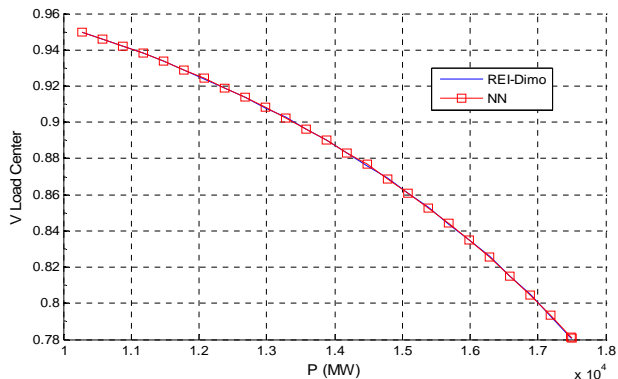


Figure 11. The Comparison P vs Stability Index between REI-Dimo and ANN

Table 6. The Comparison of REI-Dimo and ANN Result

No	Output	REI-Dimo	ANN Method	Error
1.	V <sub>Load(max)</sub>	0.781	0.7807	0.00038
2.	SSSL	-1.2376	-1.2265	0.00897

Table 7. A few of Data Testing from REI-Dimo

P Load Center (MW)	Q Load Center (MVAR)	V Load Center (pu)	Θ Load Center (degree)	D	E	SSSL Index
10460	4100.32	0.948	-27.993	61.1773	120.6233	-59.4459
10710	4198.32	0.945	-29.819	61.342	120.47	-59.128
10960	4296.32	0.941	-31.656	61.521	120.31	-58.785
11210	4394.32	0.938	-33.504	61.714	120.13	-58.415
11460	4492.32	0.934	-35.365	61.924	119.94	-58.016

Table 8. The Comparison of Data Testing and Target for Index SSSL

No. Data	Data Testing	Data Target	Error
1	-59.1794	-59.4459	0.0045
2	-58.9366	-59.1280	0.0032
3	-58.6467	-58.7850	0.0024
4	-58.3024	-58.4150	0.0019
5	-58.3482	-58.0160	0.0057

Table 9. The Comparison of Data Testing and Target for Voltage Load

No. Data	Data Testing	Data Target	Error
1	0.9457	0.9480	0.0024
2	0.9428	0.9450	0.0023
3	0.9398	0.9410	0.0013
4	0.9366	0.9380	0.0015
5	0.9364	0.9340	0.0025

#### 4. Conclusion

The estimated results obtained from ANN showed that this technique is able to predict the steady-state stability limit with a reasonable degree of accuracy. Since ANNs had high computation rates, parallel distributed processing, fault tolerance, and adaptive capability, they were excellent alternatives for real-time application combined with REI-Dimo method. The result showed that REI-Dimo and ANN had overall error in the output values was less than 0.5% which would be acceptable and it meant that the SSSANN method had strong potential for steady-state stability assessment. And by considering the training time and accuracy of the networks, it could be safely concluded that SSSANN was well-suited for online steady-state stability assessment of power systems.

#### Acknowledgments

The authors acknowledge the financial assistance granted by the Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi (DIKTI) – Hibah Guru Besar in support of this research project.

#### References

- [1] Savu C.Savulescu. Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Center. IEEE Press. Wiley. 2009
- [2] Cornel Aldea, Savu C.Savulescu. Evaluation Of The Stability Reserve Of Transelectrica's Transmission System By Using Quickstab Professional. National Conference of Energy CNE. 2004
- [3] Ching-Yin Lee, ShaoHong Tsai, Yuan-Kang Wu. A New Approach to The Assessment os Steady-State Voltage Stability Margin Using P-Q-V Curve. *Electrical Power and Energy System*. 2010
- [4] Yang Wang, Wenyuan Li, Jiping Lu. A New Node Voltage Stability Index Based on Local Phasors. *Electrical Power and Energy System*. 2009; 79; 265-271
- [5] M.Moghavveni, M.O. Faruque. Power Systm Security and Voltage Collapse: A Line Outage Based Indicator for Prediction. *Electrical Power and Energy System*. 1999; 21; 455-461
- [6] Hiendro A. A Quantities Method of Induction Motor Under Unbalanced Voltage Conditions. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2010; 8(2): 73-80.
- [7] Tumiran, Nandar CSA. Power Oscillation Damping Control using Robust Coordinated Smart Devices. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2011; 9(1): 65-72.
- [8] M.H. Haque. A Fast Method for Determining The Voltage Stability Limit of a Power System. *Electrical Power and Energy System*. 1995; 32; 35-43
- [9] Savu C. Savulescu. Solving Open Access Transmission And Security Analysis Problem with The Short-Circuit Current Method. *Latin America Power Conference*, Mexico. 2002. Page: 1-5
- [10] B.Jeyasurya. Artificial Neural Network fo Power System Steady-State Voltage Instability Evaluation. *Electrical Power and Energy System*. 2010, 29: 85-90
- [11] Anna Larsson, Alain Germond, Boming Zhang. Application of Neural Networks to the Identification of Steady-state Equivalents of External Power Systems. *International Conference On Power System Technology*, Chongqing October 2006
- [12] Ferdinando H, Pasila F, Kuswanto H. Enhanced Neuro-Fuzzy Architecture for Electrical Load Forecasting. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2010; 8(2): 87-96.
- [13] Nizam M. Kohonen Neural Network Clustering For Voltage Control In Power Systems. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2010; 8(2): 116-122.

- 
- [14]. Gupta M, Kumar R, Gupta RA. Neural Network Based Indexing and Recognition of Power Quality Disturbances. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2011; 9(2): 227-236.
- [15] Savu C. Savulescu. Equivalent for Security Analysis of Power System. *IEEE Transactions on Power Apparatus and System*, 1981; 100(5) : 2672-2682

## DATA RIWAYAT PENULIS



Penulis dilahirkan pada tanggal 18 November 1973 di Kodya Palopo, Sulawesi Selatan, merupakan anak kelima dari sembilan bersaudara pasangan Bapak M. S. Hasli dan Ibu Haliah.

Setelah menyelesaikan Sekolah Menengah Atas, penulis melanjutkan studi *Strata Satu* (S-1) di Universitas Hasanuddin (UNHAS) Jurusan Teknik Elektro. Selama studi penulis aktif sebagai asisten di Laboratorium Mesin-Mesin Listrik dan Instalasi Listrik. Selain itu penulis juga aktif dalam kegiatan internal kampus yang lain, seperti: MPM (Mahasiswa Pencinta Mushalla), Lingkar Study Filsafat Ilmu dan IKBA (*Ikatan Besar Alumni*) Siswa Palopo. Pada tahun 1998 penulis mendapat Gelar Sarjana kemudian penulis di terima sebagai staff di PT. Makassar Power, salah satu perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) di Suppa Pinrang Sulawesi Selatan selama  $\pm 1$  tahun.

Pada tahun 2000, penulis diterima sebagai staff pengajar di Jurusan Teknik Elektro Universitas Hasanuddin hingga sekarang. Kemudian di tahun 2004, penulis mengikuti Program Pasca Sarjana (S-2) di Institut Sepuluh Nopember (ITS) dengan konsentrasi Teknik sistem tenaga. Selama menempuh S-2 melakukan riset di Laboratorium Power System Operation and Control. Bidang yang ditekuni meliputi: *Power System Stability and Control*, *FACTS Device*, *Automatic Protection*. *Published paper* yang pernah penulis terbitkan: “Perlindungan Peralatan Elektronik terhadap Bahaya Sambaran Petir” (2001), “Pengamanan Manusia pada Gardu Induk” (2001), “Perbaikan Pengaturan Tegangan pada Bus yang Lemah dengan Menggunakan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM)” (2006), dan “Desain Umpan Balik *Linear*

*Quadratic Regulator (LQR) pada Static Synchronous Compensator (STATCOM)*” (2006).

Pada tahun 2009, penulis melanjutkan pendidikannya pada Program Doktor pada Institut Sepuluh Nopember (ITS) dengan konsentrasi Teknik Sistem Tenaga dengan judul disertasi “Pemodelan *Load Characteristic, Tap Changer, dan Current Limiter* pada Studi *Steady State Stability* Menggunakan Kombinasi *Dimo* dan *Artificial Intelligence*”, dengan meraih nilai IPK sempurna = 4.0. Selanjutnya pada tahun 2015, penulis pernah melakukan *short research* pada Kumamoto University di Jepang dan memberikan kuliah tamu di sana.

Selama beberapa dekade terakhir, fenomena *voltage collapse* telah meningkat di seluruh dunia karena peningkatan konsumen listrik tidak dapat diimbangi dengan peningkatan generator dan pembangunan jaringan transmisi. Dan dalam beberapa tahun terakhir, ketidakstabilan tegangan karena terlampauinya batas beban maksimum menjadi penyebab utama dari beberapa kasus *voltage collapse*. Sejumlah strategi telah diterapkan untuk mengatasi persoalan tersebut. Namun, strategi yang ada memiliki berbagai kelemahan sehingga kurang cocok untuk digunakan mengatasi masalah tersebut.

Buku ini memaparkan strategi yang tepat sebagai solusi dalam masalah stabilitas sistem tenaga listrik. Buku ini diharapkan dapat memberikan maslahat, terutama dalam bidang sistem tenaga listrik. Di samping itu, juga memberikan manfaat bagi pihak-pihak yang bekerja dalam bidang tenaga listrik sehingga dapat menyuguhkan pelayanan yang maksimal untuk kemaslahatan masyarakat.

# Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Berbasis REI-Dimo dan *Artificial Intelligence*

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](mailto:cs@deepublish.co.id)  
📍 Penerbit Deepublish  
📱 @penerbitbuku\_deepublish  
🌐 [www.penerbitdeepublish.com](http://www.penerbitdeepublish.com)



Kategori : Teknik

ISBN 978-623-02-6413-9



9 786230 264139