

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan hidayah - Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul "Optimasi Penempatan SVC dan TCSC untuk Perbaikan Profil Tegangan dan Mengurangi Rugi Transmisi Menggunakan Metode *Real-coded Genetic Algorithm*". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Skripsi ini membahas tentang analisis lokasi dan kapasitas optimal untuk perangkat FACTS yaitu SVC dan TCSC menggunakan salah satu metode kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*), yaitu *Real-coded Genetic Algorithm* dan membandingkan hasilnya apabila tidak dipasang SVC dan TCSC pada suatu sistem transmisi.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan serta dorongan dari semua pihak, penyelesaian skripsi ini tidak mungkin bisa terwujud. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar - besarnya kepada:

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan selaku dosen pembimbing skripsi pertama yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
3. Bapak Ali Musthofa, S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc selaku KKDK Konsentrasi Teknik Energi Elektrik.
5. Bapak Ir. Unggul Wibawa, M.Sc selaku dosen pembimbing skripsi kedua yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
6. Keluarga penulis, Ibu Rahayu, Mas Agus, Mas Arif, Mbak Anis Rahmawati, Mas Ahmad Udin, Adik Wiwit Anisa atas dukungan doa, finansial, dan

dorongan semangat yang senantiasa selalu diberikan hingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

7. Teman – teman HMH dan Para penghuni Kertosentono 119 atas bantuan semangat, doa, canda tawa, sekaligus waktudan tempat yang selalu tersedia untuk penulis ketika penulis ingin berkeluh kesah.
8. Teman - teman Teknik Elektro angkatan 2010 (Magnet) dan konsentrasi Teknik Energi Elektrik yang telah menemani dan saling mendukung selama menjalani perkuliahan.
9. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik yang tidak dapat disebutkan satu persatu secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala - kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu, saran dan kritik yang membangun diharapkan oleh penulis agar skripsi ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan lebih berguna. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Malang, Januari 2015

Imam Suwandi

## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR .....</b>	<b>i</b>
<b>DAFTAR ISI .....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR GAMBAR .....</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>ix</b>
<b>RINGKASAN.....</b>	<b>x</b>
<b>PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan.....	3
1.5. Manfaat.....	3
1.6. Sistematika Pembahasan .....	3
<b>TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Representasi Saluran Transmisi .....	5
2.2. Analisis Aliran Daya .....	6
2.2.1. Persamaan Aliran Daya.....	7
2.2.2. Perhitungan Aliran Daya dan Rugi-Rugi Daya pada Saluran.....	9
2.2.3. Penyelesaian Aliran Daya dengan Metode Newton-Raphson.....	10
2.3. FACTS Devices.....	15
2.3.1. Static Var Compensator (SVC).....	16
2.3.2. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC).....	18
2.4. Algoritma Genetika ( <i>Genetic Algorithm</i> ).....	21
2.4.1. Representasi Kromosom dan Inisialisasi Populasi.....	21
2.4.2. Dekode Kromosom .....	22
2.4.3. Evaluasi Fungsi .....	22
2.4.4. Elitisme .....	22
2.4.5. Seleksi .....	23
2.4.6. Pindah Silang ( <i>Crossover</i> ) .....	24
2.4.7. Mutasi ( <i>Mutation</i> ) .....	24



2.4.8.	Penggantian Populasi .....	24
2.4.9.	Kriteria Penghentian.....	25
<b>METODE PENELITIAN .....</b>		<b>26</b>
3.1.	Pengambilan Data.....	27
3.2.	Analisis Aliran Daya .....	27
3.3.	Penentuan Parameter SVC dan TCSC.....	27
3.4.	Implementasi RGA untuk Penempatan SVC dan TCSC.....	27
3.5.	Penentuan Parameter RGA.....	29
3.6.	Analisis Hasil Simulasi .....	29
3.7.	Pengambilan Kesimpulan dan Saran .....	30
<b>HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>		<b>31</b>
4.1.	Data Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali 500kV .....	31
4.1.1.	Data Saluran .....	33
4.1.2.	Data Pembebanan.....	34
4.1.3.	Data Pembangkitan .....	35
4.2.	Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali 500kV Sebelum Optimasi .....	35
4.2.1.	Aliran Daya Sistem Jawa-Bali 500 kV pada Pembebanan 100% .....	35
4.2.2.	Aliran Daya Sistem Jawa-Bali 500 kV pada Pembebanan 80% .....	38
4.3.	Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV .....	41
4.3.1.	Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV dengan Pembebanan 100% .....	41
4.3.2.	Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV dengan Pembebanan 80% .....	47
4.4.	Simulasi Sistem Standar IEEE 30 Bus .....	52
4.4.1.	Data Sistem Standar IEEE 30 Bus .....	52
4.4.2.	Aliran Daya Sistem Standar IEEE 30 Bus Sebelum Optimasi .....	56
4.4.3.	Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Standar IEEE 30 Bus .....	59
<b>PENUTUP .....</b>		<b>67</b>
5.1.	Kesimpulan.....	67
5.2.	Saran.....	68
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>69</b>

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1. Batas Tegangan pada Saluran Transmisi.....	5
Tabel 3. 1. Parameter RGA .....	29
Tabel 4. 1. Jenis Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali 500kV .....	31
Tabel 4. 2. Data Saluran Sistem Transmisi Jawa-Bali 500kV.....	33
Tabel 4. 3. Data Beban Sistem Jawa-Bali 500 kV .....	34
Tabel 4. 4. Data Pembangkitan sistem Jawa-Bali 500 kV.....	35
Tabel 4. 5. Hasil <i>Load Flow</i> Sistem Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 100% .....	36
Tabel 4. 6. Bus-bus dengan Tegangan di Bawah Standar pada Sistem Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 100% .....	37
Tabel 4. 7. Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 100%.....	37
Tabel 4. 8. Hasil <i>Load Flow</i> Sistem Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 80% .....	38
Tabel 4. 9. Bus-bus dengan Tegangan di Bawah Standar pada Sistem Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 80% .....	39
Tabel 4. 10. Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 80%.....	40
Tabel 4. 11. Hasil Pengujian Parameter RGA untuk Optimasi Penempatan SVC dan TCSC.....	41
Tabel 4. 12. Hasil Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa- Bali 500 kV dengan Pembebanan 100% .....	42
Tabel 4. 13. Perubahan Tegangan pada Bus yang Berada di Bawah Batas Standar .....	43
Tabel 4. 14. Rugi-rugi Daya pada Saluran Transmisi Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC dengan Pembebanan 100% .....	44
Tabel 4. 15. Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC.....	46
Tabel 4. 16. Lokasi dan Rating Optimal TCSC.....	46
Tabel 4. 17. Hasil Simulasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV dengan Pembebanan 80%.....	47
Tabel 4. 18. Perubahan Tegangan pada Bus yang Berada di Luar Batas Standar.....	48



Tabel 4. 19. Rugi-rugi Daya pada Saluran Transmisi Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC dengan Pembebanan 80% .....	49
Tabel 4. 20. Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC .....	51
Tabel 4. 21. Lokasi dan Rating Optimal TCSC.....	51
Tabel 4. 22. Jenis Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jawa Madura Bali 500 kV .....	52
Tabel 4. 23. Data Saluran Transmisi Sistem Standar IEEE 30 Bus .....	54
Tabel 4. 24. Data Pembebanan Sistem Standar IEEE 30 bus.....	55
Tabel 4. 25. Data Pembangkitan Sistem Standar IEEE 30 bus .....	56
Tabel 4. 26. Hasil Aliran Daya Sistem Standar IEEE 30 Bus Sebelum Optimasi .....	56
Tabel 4. 27. Bus-bus dengan Tegangan yang Tidak Memenuhi Standar .....	57
Tabel 4. 28. Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi Sistem Standar IEEE 30 Bus Sebelum Optimasi .....	58
Tabel 4. 29. Hasil Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Standar IEEE 30 Bus .....	59
Tabel 4. 30. Perubahan Tegangan pada Bus yang Berada di Luar Batas Standart.....	60
Tabel 4. 31. Rugi-rugi Daya pada Saluran Transmisi Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC .....	61
Tabel 4. 32. Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC.....	65
Tabel 4. 33. Lokasi dan Rating Optimal TCSC.....	65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1. (a) Saluran transmisi tiga fasa, (b) Representasi saluran satu fasa .....	6
Gambar 2. 2. Tipikal Bus dari Sebuah Sistem Tenaga .....	8
Gambar 2. 3. Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya .....	9
Gambar 2. 4.(a) Daya Aktif pada Kesetimbangan Daya Bus i(b) Daya Reaktif pada Kesetimbangan Daya Bus i .....	13
Gambar 2. 5. Diagram Alir Perhitungan Aliran Daya dengan <i>Newton-Raphson</i> .....	14
Gambar 2. 6. Topologi dasar SVC .....	16
Gambar 2. 7. Representasi SVC .....	17
Gambar 2. 8. Suseptansi <i>shunt</i> variabel.....	18
Gambar 2. 9. Rangkaian Sederhana TCSC Satu Fasa .....	19
Gambar 2. 10. Reaktansi Ekuivalen ( $X_{eq}$ ) TCSC .....	20
Gambar 2. 11. Model TCSC pada Saluran Transmisi .....	20
Gambar 2. 12. Model seleksi <i>roulette-wheel</i> .....	23
Gambar 3. 1. Diagram Alir Metode Penelitian.....	26
Gambar 3. 2. Diagram alir RGA.....	28
Gambar 3. 3. Konfigurasi individu FACTS <i>devices</i> .....	29
Gambar 4.1. <i>Single Line Diagram</i> Sistem Jawa-Bali 500 kV .....	32
Gambar 4. 2. Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 100%.....	43
Gambar 4. 3. Rugi Daya Aktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 100%.....	45
Gambar 4. 4. Rugi Daya Reaktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 100%.....	45
Gambar 4. 5. Grafik Konvergensi RGA untuk Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 100% .....	46
Gambar 4. 6. Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 80%.....	48
Gambar 4. 7. Rugi Daya Aktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 80%.....	50

Gambar 4. 8. Rugi Daya Reaktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 80%.....	50
Gambar 4. 9. Grafik Konvergensi RGA untuk Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 80% .....	52
Gambar 4. 10. <i>Single Line Diagram</i> Sistem Standar IEEE 30 Bus.....	53
Gambar 4. 11. Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC.....	60
Gambar 4. 12. Rugi Daya Aktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC.....	63
Gambar 4. 13. Rugi Daya Reaktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC.....	64
Gambar 4. 14. Grafik Konvergensi RGA untuk Penempatan SVC dan TCSC.....	66





## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1.** Listing Program Aliran Daya Metode Newton-Raphson
- Lampiran 2.** Listing Program Implementasi RGA pada Sistem Jawa-Bali 500 kV
- Lampiran 3.** Topologi Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali 500 kV
- Lampiran 4.** Perhitungan Nilai Kapasitansi (C) dan Induktansi (L) pada SVC dan TCSC



## RINGKASAN

**IMAM SUWANDI**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Februari 2014, Optimasi Penempatan SVC dan TCSC untuk Perbaikan Profil Tegangan dan Mengurangi Rugi Transmisi Menggunakan Metode *Real-coded Genetic Algorithm*, Dosen Pembimbing: Hadi Suyono, S.T., MT., Ph.D. dan Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

Peningkatan beban pada sistem tenaga listrik dan letak gardu induk yang jauh dari pembangkit menyebabkan jatuh tegangan yang cukup signifikan dan menimbulkan nilai rugi daya yang besar. Masalah tersebut dapat diatasi dengan menggunakan FACTS (*Flexibel Alternating Current Transmission System*) devices diantaranya *Static Var Compensator* (SVC) dan *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC). Tujuan dari penelitian ini adalah dapat menentukan lokasi serta kapasitas SVC dan TCSC yang optimal agar dapat mengurangi rugi transmisi dan memperbaiki tegangan pada bus sehingga memenuhi standar tegangan yang diijinkan yaitu  $\pm 5\%$  p.u.

Metode yang digunakan untuk menentukan lokasi serta kapasitas yang optimal untuk penempatan SVC dan TCSC yaitu dengan menggunakan metode *Real-coded Genetic Algorithm* (RGA). Simulasi diterapkan pada sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500kV dengan dua kondisi pembebanan, yaitu 100% dan 80% dengan menggunakan 3 buah SVC berkapasitas 0 sampai 250 MVAR dan 3 buah TCSC dengan rating  $-0,8X_{line}$  sampai  $0,2X_{line}$ .

Hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk sistem dengan pembebanan 100% rugi daya aktif turun sebesar 10,65% yaitu dari 154,486 MW menjadi 138,035 MW dan rugi daya reaktif turun sebesar 35,36% yaitu dari 1.591,582 MVAR menjadi 1.028,665 MVAR, dan juga tegangan tiap bus. Untuk pembebanan 80% rugi daya aktif turun sebesar 7,78% dari 94,284 MW menjadi 86,964 MW dan rugi daya reaktif turun sebesar 24,08% dari 958,645 MVAR menjadi 727,786 MVAR. Selain itu tegangan tiap bus dapat diperbaiki hingga berada pada batas tegangan yang diijinkan khususnya bus-bus dengan kondisi tegangan *undervoltage* yaitu 6 bus pada pembebanan 100% dan 4 bus pada pembebanan 80%.

Lokasi dan kapasitas optimal untuk penempatan SVC yaitu pada bus 15, 20, dan 25 dengan kapasitas masing-masing 211,000 MVAR, 135,725 MVAR, dan 229,375 MVAR pada pembebanan 100% dan 234,905 MVAR, 243,120 MVAR, dan 235,524 MVAR pada pembebanan 80%. Lokasi dan rating optimal untuk penempatan TCSC yaitu pada saluran 17, 20 dan 21 dengan rating masing-masing  $-0,7699X_{line}$ ,  $-0,7697X_{line}$ , dan  $-0,7703X_{line}$  pada pembebanan 100% dan  $-0,0118X_{line}$ ,  $0,0252X_{line}$ , dan  $-0,7474X_{line}$  pada pembebanan 80%.

Kesimpulan yang dapat diambil dari skripsi ini adalah penentuan lokasi dan kapasitas yang optimal untuk penempatan SVC dan TCSC menggunakan metode RGA mampu mengurangi rugi daya pada saluran transmisi serta mampu memperbaiki profil tegangan tiap bus, khususnya pada bus-bus yang mempunyai kondisi tegangan di bawah batas standar (*undervoltage*) sehingga dapat memenuhi batas tegangan yang diijinkan ( $0,95 \leq V_{bus} \leq 1,05$  p.u).

*Kata Kunci* – SVC, TCSC, *Real-coded Genetic Algorithm*



## SUMMARY

**IMAM SUWANDI**, Departement of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, February 2014, Optimal Placement of SVC and TCSC for Voltage Stability and Reducing Transmission Power Loss Using Real-coded Genetic Algorithm Method, Thesis Advisor: Hadi Suyono, S.T., MT., Ph.D. and Ir. Unggul Wibawa, M.Sc.

Increasing load on the power system and far location substation from generator cause significant drop voltage and rise power losses. This problems can solved with using FACTS devices such as Static Var Compensator (SVC) and Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC). The purpose of this study is determine the optimal location and size of SVC and TCSC to reduce transmission loss and improve the voltage of the bus so that can meet the standard of allowable voltage  $\pm 5\%$  p.u.

The method that use to find the optimal location and size of SVC and TCSC is Real-coded Genetic Algorithm (RGA) method. Simulation applied on Jawa-Bali 500 kV transmission system with two kind of loading condition is 100% and 80%. The simulation use 3 SVC with capacity 0-250 MVAR and 3 TCSC with rating  $-0,8X_{line}$  to  $0,2X_{line}$ .

The simulation results is for system with loading condition 100% the active power loss decreased 10,65% from 154,486 MW to 138,035 MW and the reactive power loss decreased 35,36 % from 1.591,582 MVAR to 1.028,665 MVAR. For system with loading condition 80% the active power loss decreased 7,78% from 94,284 MW to 86,964 MW and the reactive power loss decreased 24,08% from 958,645 MVAR to 727,786 MVAR. The other than the voltage level system can improved until meet the standard that determine in particular at buses with condition undervoltage, 6 buses with loading condition 100% and 4 buses with loading condition 80%.

The optimal location of SVC at bus 15, 20, and 25 with each capacity 211,000 MVAR, 135,725 MVAR, dan 229,375 MVAR at the system with loading condition 100% and 234,905 MVAR, 243,120 MVAR, and 235,524 MVAR at the system with loading condition 80%. The optimal location of TCSC at line 17, 20 and 21 with each rating  $-0,7699X_{line}$ ,  $-0,7697X_{line}$ , dan  $-0,7703X_{line}$  at the system with loading condition 100% dan  $-0,7699X_{line}$ ,  $-0,7697X_{line}$ , dan  $-0,7703X_{line}$  at the system with loading condition 80%.

The conclusion of this thesis is determining the optimal location and size of SVC and TCSC using RGA metode can reduce power losses and improve the voltage system, in paticularly buses with condition undervoltage until meet the allowed voltage limit ( $0,95 \leq V_{bus} \leq 1,05$  p.u).

Key Words – SVC, TCSC, Real-coded Genetic Algorithm



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Pemenuhan kebutuhan listrik terus meningkat seiring bertambahnya pertumbuhan beban dari tahun ke tahun. Hal tersebut menjadi suatu tantangan bagi operasi sistem tenaga listrik karena peningkatan jumlah beban tidak sebanding dengan perluasan sistem pembangkit tenaga listrik. Dalam hal pemenuhan kebutuhan beban tersebut selain membutuhkan kehandalan sistem yang baik juga harus memperhatikan kemampuan dari sistem tenaga listrik baik dari sisi pembangkit, saluran transmisi hingga saluran distribusi.

Masalah lain yang harus dihadapi operasi sistem tenaga listrik adalah letak gardu induk yang berada sangat jauh dari sistem pembangkit sehingga mengakibatkan penurunan level tegangan yang cukup signifikan. Level tegangan turut berdampak pada kualitas daya yang dihasilkan. Fenomena tersebut disebabkan kawat saluran mempunyai nilai resistansi, induktansi dan kapasitansi, sehingga menimbulkan jatuh tegangan sepanjang saluran serta rugi daya. Rugi-rugi daya merupakan hal yang harus dihindari karena sangat merugikan, sehingga kehadirannya harus diminimalisasi.

Beberapa cara untuk menstabilkan level tegangan dan mengurangi rugi daya antara lain dengan menempatkan peralatan konvensional kapasitor bank (*fix capacitor*) atau dengan menggunakan peralatan *Flexible Alternating Current Transmission System* (FACTS). FACTS adalah suatu komponen pada sistem transmisi arus bolak-balik yang menggunakan kontrol elektronika daya berupa thyristor untuk melakukan kontrol *switching* yang dapat mengkompensasi drop tegangan dan meningkatkan kemampuan transfer daya.

*Static Var Compensator* (SVC) dan *Thyristor Controlled Series Capacitor* (TCSC) adalah dua perangkat FACTS tipe impedansi variabel yang mudah diimplementasikan pada jaringan transmisi listrik untuk mendapatkan hasil aliran daya yang lebih baik. SVC dipasang secara paralel pada bus dan digunakan untuk mengatur tegangan bus dengan cara menginjeksikan daya reaktif yang dapat dikontrol melalui sudut penyalaan *thyristor*. Sedangkan TCSC dipasang secara seri dengan saluran transmisi dan digunakan untuk meningkatkan kapabilitas daya pada saluran transmisi. Pengaturan

reaktansi saluran transmisi dapat dilakukan dengan mengendalikan reaktansi TCSC sehingga daya yang mengalir dapat ditingkatkan atau dengan kata lain peningkatan kapabilitas saluran transmisi. Pemasangan SVC dan TCSC ini dapat dilakukan pada satu atau beberapa titik untuk mencapai nilai tegangan dan rugi daya paling optimum yang diharapkan.

Permasalahan umum yang terjadi dalam sebuah sistem adalah penentuan lokasi dan rating optimal dari peralatan FACTS. Salah satu metode untuk menyelesaikan permasalahan optimasi adalah dengan menggunakan *Real-coded Genetic Algorithm* (RGA). RGA sendiri adalah metode optimasi pengembangan dari GA yang menggunakan pengkodean riil. Metode ini digunakan untuk menentukan lokasi dan rating yang paling optimal untuk penempatan peralatan kompensator agar dapat mengendalikan aliran daya pada saluran transmisi.

### 1.2. Rumusan Masalah

Sehubungan dengan hal – hal yang dikemukakan di atas, maka dapat dirumuskan permasalahan dalam skripsi ini sebagai berikut :

1. Dimana lokasi dan berapa besar kapasitas SVC yang optimal agar dapat memperbaiki level tegangan serta menghasilkan rugi daya paling kecil menggunakan RGA.
2. Dimana lokasi dan berapa besar rating TCSC yang optimal agar dapat memperbaiki level tegangan serta menghasilkan rugi daya paling kecil menggunakan RGA.
3. Berapa besar rugi daya dan nilai tegangan tiap bus pada sistem sebelum dilakukan optimasi dan setelah dilakukan optimasi.

### 1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah yang diajukan dalam penelitian ini meliputi :

1. Analisis dilakukan pada sistem tenaga listrik Jawa Madura Bali 500 kV, tidak menggunakan parameter faktor daya, tidak memperhitungkan pertumbuhan beban di masa mendatang, dan perubahan fluktuasi beban.
2. Sistem dianggap setimbang.
3. Metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan adalah metode RGA.
4. Pengaruh harmonisa yang timbul pada sistem karena adanya komponen elektronika daya diabaikan.



5. Tidak membahas faktor biaya yang berkaitan dengan penempatan kompensator pada sistem tenaga listrik.
6. Analisis aliran daya dilakukan dengan menggunakan metode Newton-Raphson

#### 1.4. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah dapat menentukan lokasi penempatan serta kapasitas SVC dan TCSC paling optimal untuk memperbaiki level tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem transmisi Jawa – Bali 500 kV dengan menggunakan metode RGA.

#### 1.5. Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah untuk dapat diterapkan pada sistem transmisi Jawa – Bali 500 kV ataupun sistem transmisi lainnya yang berkaitan dengan penentuan lokasi SVC dan TCSC yang akan dipasang untuk memperbaiki permasalahan perbaikan level tegangan.

#### 1.6. Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan penyusunan skripsi ini adalah sebagai berikut :

##### BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan mengenai pelaksanaan penelitian dilakukan berdasarkan latar belakang yang terjadi. Dari latar belakang tersebut didapatkan tujuan yang akan dicapai. Selain itu terdapat batasan-batasan masalah serta manfaat penelitian. Bagian pendahuluan diakhiri dengan sistematika pembahasan yang menggambarkan kerangka pikir penulis dalam mengerjakan skripsi ini.

##### BAB II: STUDI LITERATUR

Penelitian skripsi ini dikerjakan berdasarkan teori-teori yang berlaku dan telah teruji secara akademis. Oleh karena itu pada bagian kedua skripsi berisi mengenai konsep-konsep yang digunakan sebagai dasar untuk menyelesaikan permasalahan. Konsep-konsep yang digunakan di antaranya mengenai kompensasi beban dan rugi-rugi, kompensasi daya reaktif menggunakan SVC dan TCSC serta metode RGA sebagai *undetermination solution*.



**BAB III : METODOLOGI PENELITIAN**

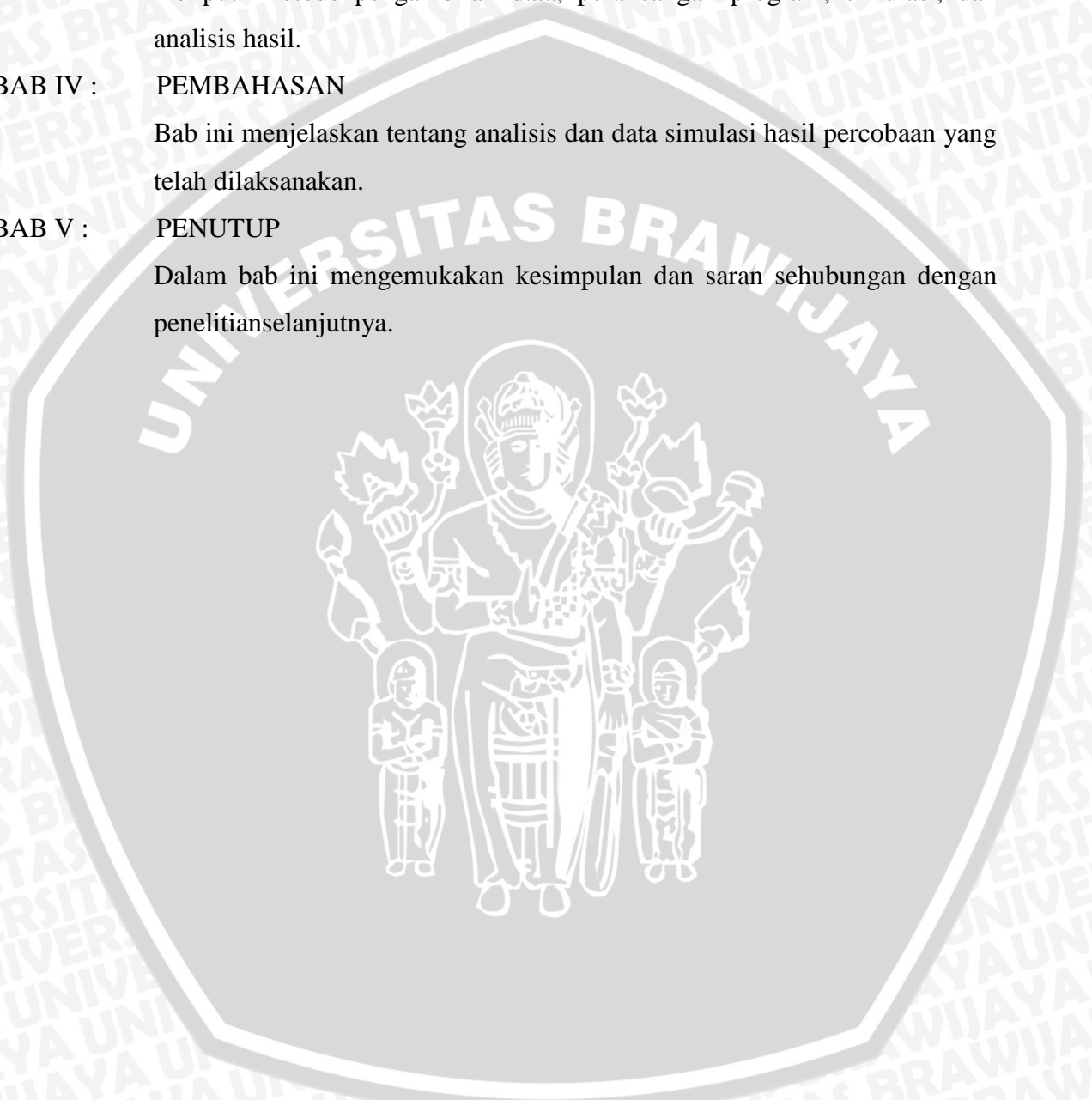
Memberikan penjelasan tentang metode yang digunakan dalam skripsi ini, meliputi metode pengambilan data, perancangan program, simulasi, dan analisis hasil.

**BAB IV : PEMBAHASAN**

Bab ini menjelaskan tentang analisis dan data simulasi hasil percobaan yang telah dilaksanakan.

**BAB V : PENUTUP**

Dalam bab ini mengemukakan kesimpulan dan saran sehubungan dengan penelitian selanjutnya.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Representasi Saluran Transmisi

Proses penyaluran daya pada sistem tenaga listrik diawali dari pembangkitan, kemudian disalurkan melalui sistem jaringan transmisi, lalu disalurkan kepada pelanggan distribusi. Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia mengenai aturan jaringan sistem tenaga listrik pada tahun 2007, karakteristik unjuk kerja jaringan transmisi harus memenuhi persyaratan-persyaratan :

- a. Frekuensi nominal 50 Hz, diusahakan tidak lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih tinggi dari 50,5 Hz, dan selama keadaan darurat (*emergency*) dan gangguan, frekuensi sistem diijinkan turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52 Hz.
- b. Tegangan sistem harus dipertahankan dalam batasan yang dituliskan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2. 1. Batas Tegangan pada Saluran Transmisi

Tegangan Nominal	Batas Atas	Batas Bawah
500 kV	+5%	-5%
150 kV	+5%	-10%
70 kV	+5%	-10%
20 kV	+5%	-10%

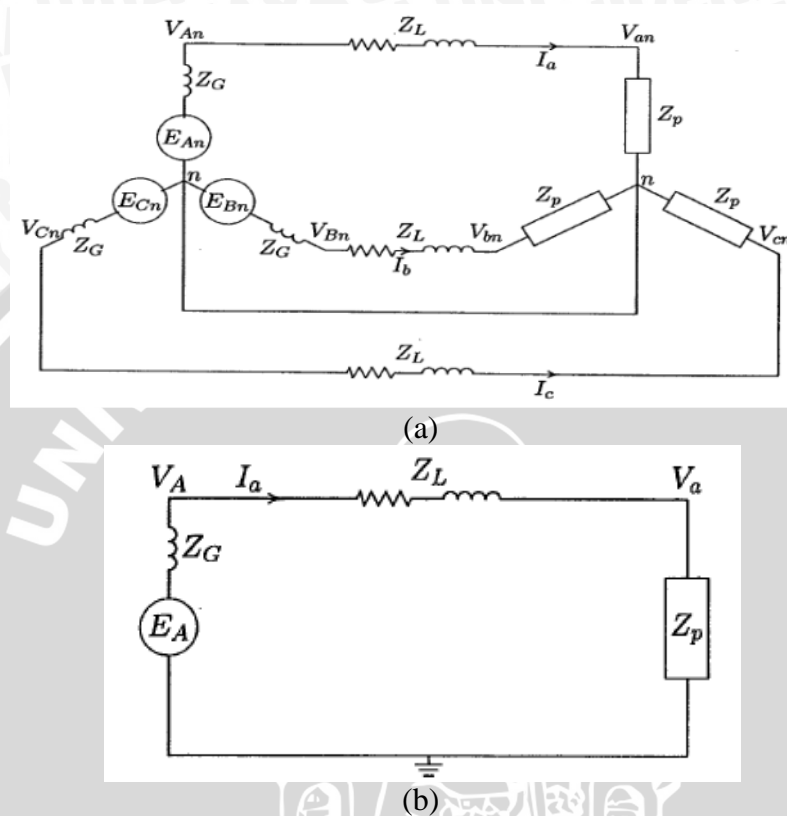
Sumber : Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (2007:7)

- c. Faktor daya ( $\cos \phi$ ) pada jaringan transmisi sebesar 0,85 *lagging*.

Pada dasarnya tujuan jaringan transmisi adalah untuk mengirimkan energi elektrik dari unit pembangkit pada beberapa lokasi menuju sistem distribusi yang terhubung ke beban. Sepanjang saluran transmisi pada sistem tenaga terdapat komponen elektrik seperti resistansi, induktansi, kapasitansi, serta konduktansi.

Pada umumnya sistem transmisi menggunakan tiga fasa. Dalam gambar 2.1 (a) ditunjukkan saluran tiga fasa dengan kawat netral  $n$ . Dalam keadaan tegangan dan arus yang simetris tidak ada arus yang mengalir pada kawat netral  $n - n'$ . Karena ketiga fasanya simetris, artinya ketiga fasanya tergeser  $-120^\circ$  dan  $120^\circ$  terhadap fasa referensi, maka

analisa cukup dilakukan pada satu fasa saja seperti ditunjukkan pada gambar 2.1 (b). Semisal dipilih fasa  $a$  sebagai referensi, maka besaran – besaran untuk fasa  $b$  dan  $c$  diperoleh dengan memutar besaran fasa  $a$  dengan sudut  $-120^\circ$  dan  $+120^\circ$  (Hutauruk,1994:54).



Gambar 2. 1. (a) Saluran transmisi tiga fasa, (b) Representasi saluran satu fasa

Sumber : Hutauruk (1994:54)

## 2.2. Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan bagian yang penting dalam sebuah sistem tenaga listrik. Dengan ini dapat diketahui sudut dan besar tegangan pada tiap bus, impedansi saluran, daya aktif, dan daya reaktif yang mengalir pada saluran transmisi. Besaran tersebut berguna untuk mengevaluasi kinerja suatu sistem tenaga listrik dan juga menganalisis kondisi pembangkitan, saluran transmisi, dan beban dalam kondisi normal hingga kondisi saat mengalami ketidakstabilan. Untuk itu dibutuhkan studi aliran daya sehingga diketahui kondisi sebenarnya dari suatu sistem tenaga listrik.

Pada umumnya permasalahan yang timbul dari studi aliran daya adalah ketika beban antara fasa satu dengan lainnya tidak seimbang. Oleh karena itu dalam penyelesaian studi



aliran daya, sistem diasumsikan dalam keadaan stabil, beban seimbang antar fasa, dan tidak mengalami gangguan sehingga perhitungannya dalam satu fasa (Saadat, 1999:189).

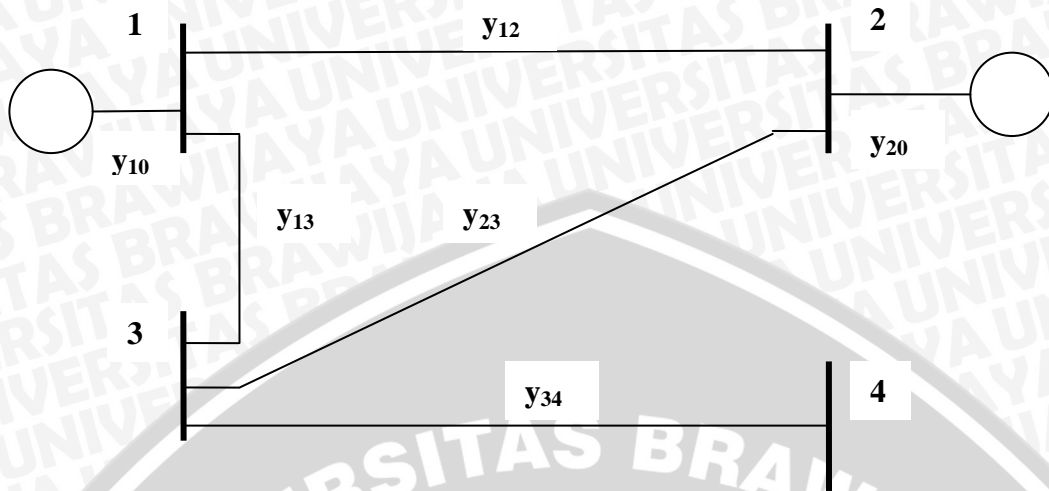
Perhitungan aliran daya mencakup tegangan, daya aktif, daya reaktif, daya total yang mengalir pada saluran transmisi atau antar bus hingga daya aktif dan reaktif yang dihasilkan oleh generator atau pembangkitan. Bus yang dimaksudkan terbagi menjadi tiga bagian, yaitu :

1. *Slack* bus atau disebut juga *swing* bus. Satu bus ditetapkan sebagai slack bus dan dipilih sebagai referensi dimana nilai magnitude dan sudut fasa tegangan pada bus ini telah ditetapkan. Bus ini sebagai penyuplai kekurangan daya yang dibangkitkan oleh bus-bus pembangkitan yang lain.
2. *Voltage Controlled* Bus atau bus generator. Pada bus ini nilai daya real  $P$  dan harga skalar  $|V|$  telah ditentukan. Sedangkan sudut fasa dan daya reaktif pada bus ini perlu dihitung. Bus ini disebut dengan PV bus.
3. *Load* bus atau bus beban. Pada bus ini nilai daya  $P$  dan  $Q$  telah ditentukan. Besar magnitude dan sudut fasa tegangan pada bus tidak diketahui. Bus ini disebut dengan PQ bus.

Untuk kebutuhan studi aliran daya, terdapat data-data dari bus dan data dari saluran transmisi pada sebuah sistem tenaga listrik. Data-data yang terdapat pada tiap-tiap bus meliputi: magnitude tegangan dalam p.u., sudut tegangan ( $\theta$ ), besar pembebanan yang terdiri dari daya aktif ( $P$ ) dan daya reaktif ( $Q$ ), besar pembangkitan yang terdiri dari daya aktif ( $P$ ), daya reaktif ( $Q$ ),  $Q_{min}$ , dan  $Q_{max}$ . Sedangkan data-data yang terdapat pada saluran transmisi meliputi : resistansi saluran transmisi dalam p.u., reaktansi saluran transmisi dalam p.u., tap trafo (biasanya bernilai 1), dan rating tegangan dalam kilo volt (kV).

### 2.2.1. Persamaan Aliran Daya

Gambaran sederhana dari tipikal bus pada sistem tenaga dapat dilihat pada Gambar 2.2. Pada gambar tersebut dijabarkan proses aliran arus dari bus dengan melewati admitansi pada masing-masing bus dan menggambarkan tegangan bus dan tegangan pada tiap-tiap saluran transmisi.



Gambar 2. 2. Tipikal Bus dari Sebuah Sistem Tenaga  
 Sumber : Saadat (1999:209)

Dari Gambar 2.2, nilai dari tegangan bus dan arus dapat diwakili dengan persamaan-persamaan matriks admitansi. Untuk sistem pada Gambar 2.2, persamaan arus pada simpul dalam bentuk matrik adalah (Saadat, 1999:192) :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & 0 \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & 0 \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ 0 & 0 & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \quad (2-2)$$

Dengan  $I_{bus}$  adalah vektor arus bus yang diinjeksikan. Arus positif jika menuju bus dan negatif jika meninggalkan bus.  $V_{bus}$  adalah vektor tegangan bus yang diukur dari simpul referensi.  $Y_{bus}$  dikenal sebagai matriks admitansi bus. Matrik admitansi bus ( $Y_{bus}$ ) ini terbentuk dari elemen diagonal masing-masing simpul dan elemen diagonal antara simpul-simpul. Elemen diagonal masing-masing simpul adalah sama dengan penjumlahan dari admitansi yang dihubungkan padanya dan ini dikenal sebagai admitansi sendiri, yaitu:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n Y_{ij} \quad j \neq i \quad (2-3)$$

Sedangkan elemen diagonal antara simpul-simpul adalah sama dengan admitansi yang dihubungkan padanya dengan tanda negatif, dan ini dikenal sebagai admitansi bersama, yaitu:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij} \quad (2-4)$$

Jaringan sistem tenaga seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, maka nilai arus dapat dicari dengan menggunakan hukum Kirchoff sebagai berikut (Saadat, 1999:208) :

$$I_i = y_{i0} V_i + y_{i1} (V_i - V_1) + y_{i2} (V_i - V_2) + y_{i3} (V_i - V_3) + \dots + y_{in} (V_i - V_n) \quad (2-5)$$

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + y_{i3} \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - y_{i3}V_3 - \dots - y_{in}V_n \quad (2-6)$$

Sehingga dapat disederhanakan menjadi :

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad j \neq i \quad (2-7)$$

Untuk mencari persamaan daya aktif dan reaktif yang mengalir pada Gambar 2.2 dapat dicari melalui Persamaan (2-8):

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (2-8)$$

atau dapat juga diubah menjadi Persamaan (2-9):

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2-9)$$

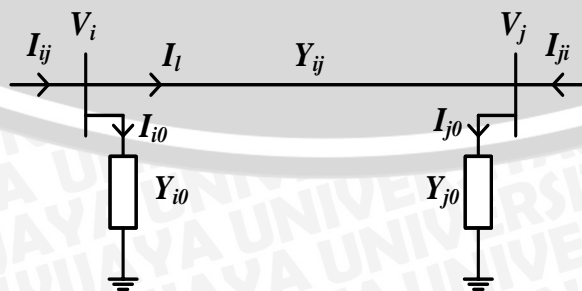
Substitusi Persamaan (2-7) dan Persamaan (2-9) sehingga didapatkan hubungan persamaan antara daya aktif dan daya reaktif dengan admitansi pada saluran transmisi sebagai berikut :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j, \quad j \neq i \quad (2-10)$$

Dari Persamaan (2-10) diketahui bahwa untuk mencari nilai aliran daya pada busi dibutuhkan adanya iterasi karena merupakan persamaan aljabar yang non-linear.

### 2.2.2. Perhitungan Aliran Daya dan Rugi-Rugi Daya pada Saluran

Untuk perhitungan aliran daya, diasumsikan aliran daya terjadi antara dua bus ( i dan j ) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2. 3. Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya  
Sumber : Saadat (1999:212)



Dari Gambar 2.3, dimisalkan bahwa arus yang mengalir dari bus  $i$  menuju bus  $j$  atau arus  $I_{ij}$  bila ditinjau dari bus  $j$  maka arus tersebut bernilai positif, sehingga didapatkan

Persamaan (2-11):

$$I_{ij} = I_i + I_{i0} = y_{ij}(V_i - V_j) + y_{i0}V_i \quad (2-11)$$

Apabila ditinjau dari sisi bus  $i$ , maka arus yang mengalir bernilai negatif seperti pada Persamaan (2-12):

$$I_{ji} = -I_i + I_{j0} = y_{ij}(V_j - V_i) + y_{j0}V_j \quad (2-12)$$

Persamaan daya kompleks  $S_{ij}$  dari bus  $i$  menuju ke bus  $j$  dan daya kompleks  $S_{ji}$  dari bus  $j$  menuju bus  $i$  adalah sebagai berikut :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i(V_i^* - V_j^*)y_{ij}^* + V_i V_i^* y_{i0}^* \quad (2-13)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* = V_j(V_j^* - V_i^*)y_{ij}^* + V_j V_j^* y_{j0}^* \quad (2-14)$$

Sehingga dapat diketahui besar rugi-rugi daya yang timbul pada saluran transmisi sebagai berikut :

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2-15)$$

Dengan  $S_{Lij}$  adalah total rugi-rugi daya pada saluran transmisi,  $S_{ij}$  adalah nilai rugi-rugi saluran transmisi  $i$ - $j$ , dan  $S_{ji}$  adalah nilai rugi-rugi saluran transmisi  $j$ - $i$ .

### 2.2.3. Penyelesaian Aliran Daya dengan Metode Newton-Raphson

Secara umum metode Newton-Raphson hampir sama dengan metode Gauss-Seidel, akan tetapi metode Newton-Raphson lebih efisien dan praktis dalam menyelesaikan permasalahan studi aliran daya pada sistem tenaga yang besar. Jumlah iterasi yang dibutuhkan dalam melakukan penyelesaian perhitungan didasarkan pada ukuran sistem. Dalam permasalahan aliran daya, daya aktif dan magnitude tegangannya dispesifikasikan untuk bus generator sedangkan aliran daya diformulasikan dalam bentuk polar (Saadat, 1999:232).

Dari Gambar 2.2, arus yang masuk bus dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2-7) yang dapat dituliskan kembali persamaannya menjadi (Saadat, 1999:232)

:

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2-16)$$

Dari Persamaan (2-16) diatas, apabila diubah dalam bentuk polar akan didapatkan Persamaan (2-17):

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2-17)$$

Dengan  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$  dan  $\delta_j$  adalah sudut tegangan pada bus j.

Persamaan daya kompleks pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2-18)$$

Substitusi Persamaan (2-17) dan Persamaan (2-18) akan didapatkan persamaan :

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) (\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j) \quad (2-19)$$

Sehingga apabila bagian real dan imajiner pada persamaan diatas dipisahkan, maka didapatkan persamaan berikut :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-20)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-21)$$

Dengan  $I_i$  adalah arus pada busi,  $V_i$  merupakan tegangan pada busi,  $V_j$  merupakan tegangan pada bus j,  $Y_{ij}$  adalah admitansi antara bus i dan j,  $P_i$  adalah daya aktif pada bus i,  $Q_i$  adalah daya reaktif pada busi,  $\theta_{ij}$  adalah sudut polar admitansi  $Y_{ij}$ , dan  $\delta_j$  merupakan sudut tegangan  $V_j$ .

Dari kedua persamaan diatas, yaitu Persamaan (2-20) dan Persamaan (2-21) akan dikembangkan dengan Deret Taylor sehingga menjadi persamaan :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \hline \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

Pada persamaan (2-22) diatas sistem terdiri dari slack bus dan PQ bus, diasumsikan bahwa bus 1 merupakan *slack* bus dan bus 2 sampai bus ke-n adalah PQ bus. Matriks Jacobian memberikan hubungan yang linier antara perubahan sudut tegangan  $\Delta \delta_i^{(k)}$  dan



besar tegangan  $\Delta|V_i^{(k)}|$  dan dengan perubahan pada daya aktif dan reaktif ( $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$ ). Elemen-elemen pada matriks Jacobian merupakan turunan parsial dari Persamaan (2-20) dan Persamaan (2-21) pada saat  $\Delta\delta_i^{(k)}$  dan  $\Delta|V_i^{(k)}|$ , sehingga dapat dimodelkan seperti Persamaan (2-23) :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

Banyaknya matriks Jacobian dari persamaan (2-23) adalah  $(2n-2-m) \times (2n-2-m)$ , dengan  $n$  adalah banyaknya bus pada sistem, sedangkan  $m$  adalah banyaknya *voltage-controlled buses* pada sistem. Bus-bus dengan tegangan yang diatur dapat diperhitungkan dengan mudah. Karena pada bus semacam itu besarnya tegangan konstan, kolom differensial parsial terhadap besar tegangan bus itu dihilangkan dalam jacobian. Selain itu juga dihilangkan baris differensial parsial dari  $Q$  untuk bus dengan pengaturan tegangan. Untuk elemen  $J_1$  memiliki ukuran matriks  $(n-1) \times (n-1)$ , elemen  $J_2$  memiliki ukuran  $(n-1) \times (n-1-m)$ , elemen  $J_3$  memiliki ukuran  $(n-1-m) \times (n-1)$ , dan untuk elemen  $J_4$  memiliki ukuran  $(n-1-m) \times (n-1-m)$ .

Persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen  $J_1$  adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-24)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2-25)$$

Persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen  $J_2$  adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-26)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2-27)$$

Persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen  $J_3$  adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-28)$$

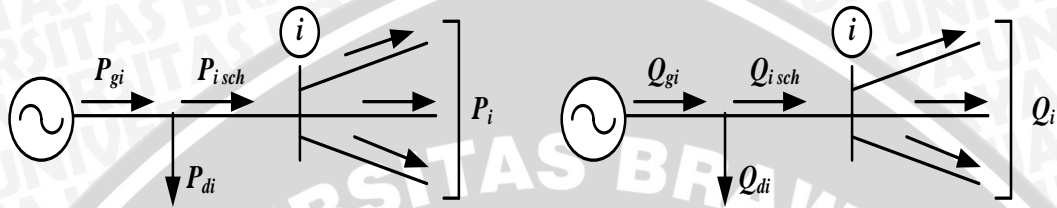
$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2-29)$$

Persamaan diagonal dan off-diagonal dari elemen  $J_4$  adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-30)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), j \neq i \quad (2-31)$$

Dalam Gambar 2.4 diperlihatkan aliran kesetimbangan daya pada busi. Untuk mendapatkan persamaan daya *scheduling*, daya sisa (*power residual / power mismatch*) dan perhitungan baru untuk sudut fasa serta tegangan bus yang baru (Grainger & Stevenson,1994:331).



Gambar 2. 4.(a) Daya Aktif pada Kesetimbangan Daya Bus i(b) Daya Reaktif pada Kesetimbangan Daya Busi  
Sumber : Grainger & Stevenson (1994:331)

Dari Gambar 2.4 diatas, didapatkan persamaan daya *scheduling* sebagai berikut :

$$P_i^{sch} = P_{gi} - P_{di} \quad (2-32)$$

$$Q_i^{sch} = Q_{gi} - Q_{di} \quad (2-33)$$

Dengan  $P_{gi}$  adalah jumlah daya aktif yang dibangkitkan sistem dalam mega watt (MW),  $P_{di}$  adalah jumlah daya aktif beban dalam mega watt (MW),  $Q_{gi}$  adalah jumlah daya reaktif yang dibangkitkan sistem dalam mega volt ampere reaktif (MVAR), dan  $Q_{di}$  adalah jumlah daya reaktif beban dalam mega volt ampere reaktif (MVAR).

Persamaan untuk *power mismatch* adalah sebagai berikut :

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2-34)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2-35)$$

Sehingga didapatkan tegangan dan sudut baru, yaitu :

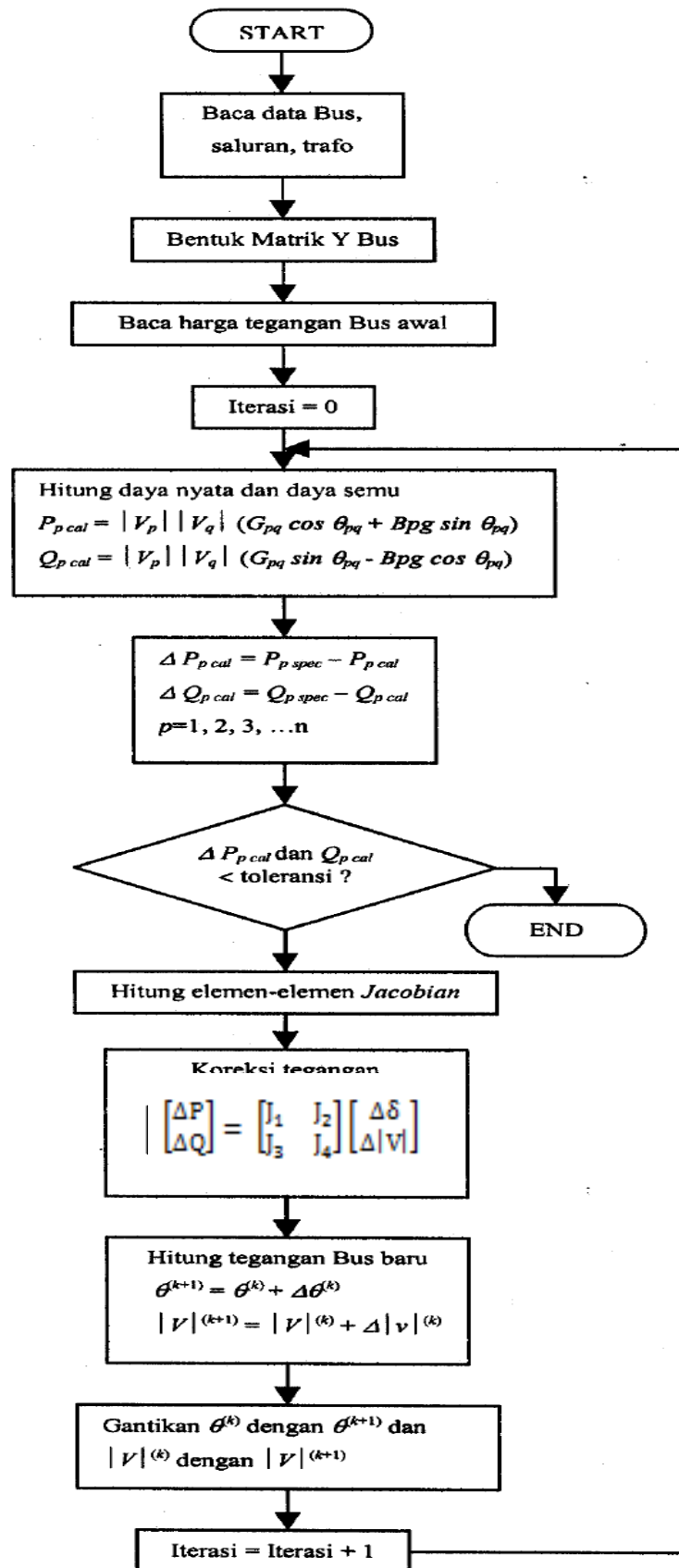
$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (2-36)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (2-37)$$

Secara umum prosedur penyelesaian aliran daya dapat dilihat pada diagram alir

Gambar 2.5.





Gambar 2. 5. Diagram Alir Perhitungan Aliran Daya dengan *Newton-Raphson*  
 Sumber : Hosea & Tanoto (2004:65)



Berdasarkan diagram alir pada Gambar 2.5 dapat diuraikan prosedur penyelesaian aliran daya dengan menggunakan metode Newton Raphson adalah (Saadat, 1999:235) :

1. Membentuk sebuah matriks admitansi bus ( $Y_{bus}$ )
2. Untuk  $load_{bus}$ ,  $P_i^{sch}$  dan  $Q_i^{sch}$  ditetapkan, magnitude tegangan dan sudut fasanya dibuat sama dengan nilai dari  $slack_{bus}$  atau 1,0 dan 0,0. Sebagai contoh:  $|V_i^{(0)}| = 1,0$  dan  $\delta_i^{(0)} = 0,0$ . Untuk generator bus,  $|V_i|$  dan  $P_i^{sch}$  ditetapkan, sudut fasa dibuat sama dengan sudut fasa  $slack_{bus}$ , sebagai contoh :  $\delta_i^{(0)} = 0,0$ .
3. Untuk  $load$  bus,  $P_i^{(k)}$  dan  $Q_i^{(k)}$  dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-6) dan (2-21) sedangkan  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  dihitung dengan menggunakan Persamaan (2-20) dan (2-21).
4. Untuk generator bus,  $P_i^{(k)}$  dan  $\Delta P_i^{(k)}$  dihitung dengan menggunakan persamaan (2-21) dan (2-34).
5. Elemen-elemen matriks Jacobian ( $J_1, J_2, J_3,$  dan  $J_4$ ) dihitung dengan menggunakan persamaan (2-24) hingga (2-31).
6. Persamaan linear (2-23) diselesaikan dengan faktorisasi *optimally ordered triangular* dan eliminasi Gauss.
7. Sudut fasa dan magnitude tegangan yang baru dihitung dengan menggunakan persamaan (2-36) dan (2-37).
8. Proses ini diulangi sampai nilai dari  $\Delta P_i^{(k)}$  dan  $\Delta Q_i^{(k)}$  kurang dari nilai akurasi yang telah ditentukan.

### 2.3. FACTS Devices

Pada perkembangan sistem tenaga listrik telah dikenalkan suatu perangkat kontroler elektronika daya yang mampu mengatur daya aktif maupun reaktif secara cepat dan dinamis. Perangkat ini dapat membuat transmisi jaringan AC beradaptasi dengan perubahan kondisi yang disebabkan oleh perubahan beban. *Flexible AC Transmission System* (FACTS) adalah suatu alat statis berbasis sistem elektronika daya yang menyediakan kontrol beberapa parameter pada saluran transmisi AC.

Berdasarkan penggunaan kontrol, perangkat FACTS diklasifikasikan menjadi (Padiyar, 2007:8):

1. Tipe *Variable impedance*. Seperti *static VAR compensator* (SVC), *thyristor controlled series compensator* (TCSC), serta *thyristor controlled phase shifting transformer* (TCPST).



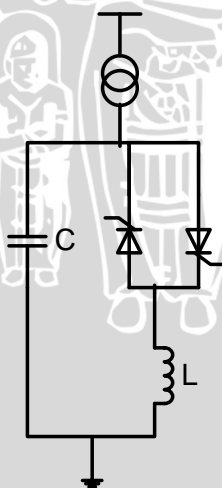
2. Tipe *voltage source converter* (VSC). Seperti *static synchronous compensator* (STATCOM), *static synchronous series compensator* (SSSC), *interline power flow controller* (IPFC), *unified power flow controller* (UPFC).

### 2.3.1. Static Var Compensator (SVC)

SVC merupakan salah satu jenis perangkat FACTS tipe *impedance variable* yang berfungsi baik untuk membangkitkan maupun menyerap daya reaktif. Tujuannya adalah menyediakan peningkatan faktor daya secara dinamis dan juga menyeimbangkan arus pada sisi sumber kapanpun dibutuhkan.

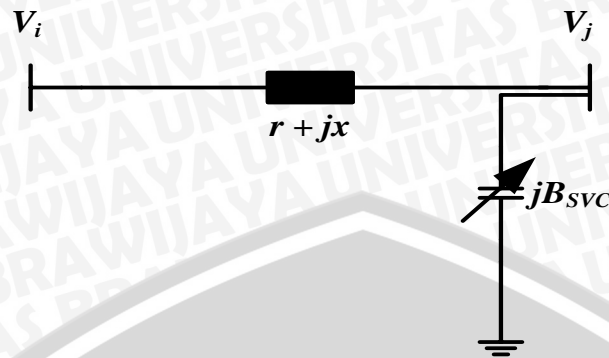
Pada bentuk yang paling sederhana, SVC terdiri atas *thyristor controlled reactor* (TCR) yang dipasang secara paralel dengan kapasitor *bank*. Prinsip kerja SVC secara umum adalah mengompensasi daya reaktif dengan cara mengatur sudut penyalaan *thyristor* sehingga dapat mengatur keluaran daya reaktif dari SVC. Pada praktiknya SVC dapat dikatakan sebagai reaktansi kompensasi induktif sekaligus kapasitif yang dapat diatur.

Peletakan SVC sangat penting untuk menentukan keefektifannya dalam menjalankan fungsi sebagai kompensator daya reaktif. Berikut adalah permodelan sistem SVC seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6. Topologi dasar SVC  
Sumber : Sadikovic (2006:30)

Representasi permodelan SVC yang terhubung pada saluran  $i$  dan  $j$  ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 7. Representasi SVC  
 Sumber : Sadikovic(2006:31)

Pada Gambar 2.7 menunjukkan model injeksi SVC, dimana sebuah arus reaktif diinjeksikan pada titik  $j$ , sedangkan  $V_i$  dan  $V_j$  secara berturut-turut adalah tegangan pada titik  $i$  dan  $j$ . Daya reaktif yang diinjeksikan pada titik  $j$  dituliskan dalam persamaan berikut (Sadikovic, 2006:30):

$$Q_j = -V_j^2 B_{SVC} \tag{2-38}$$

Dimana:  $Q_j$  = daya reaktif pada titik  $j$

$V_j$  = tegangan pada titik  $j$

$B_{SVC} = B_C - B_L$ ,  $B_C$  dan  $B_L$  adalah suseptansi pada fixed capacitor dan TCR.

Daya reaktif dapat diubah menjadi bentuk arus injeksi pada bus  $j$  dengan persamaan berikut (Sadikovic, 2006:30):

$$I_{jSVC} = jV_j B_{SVC} \tag{2-39}$$

Dimana:  $I_{jSVC}$  = arus injeksi SVC

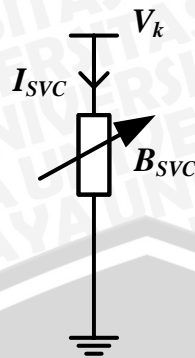
Terdapat dua macam konfigurasi SVC (Acha, 2004:155):

1. Model suseptansi *shunt* variabel:

Rangkaian ekivalen untuk model suseptansi *shunt* variabel ditunjukkan pada Gambar 2.8.







Gambar 2. 8. Suseptansi *shunt* variabel  
Sumber : Acha(2004:155)

Berdasarkan Gambar di atas, arus pada SVC dapat dihitung dengan persamaan:

$$I_{SVC} = jB_{SVC}V_{(k)} \quad (2-40)$$

Sementara untuk persamaan daya reaktif pada SVC yang juga merupakan daya reaktif yang diinjeksikan ke busk adalah:

$$Q_{SVC} = Q_k = -V_k^2 B_{SVC} \quad (2-41)$$

## 2. Model *firing angle*

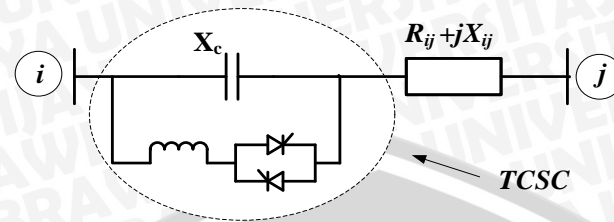
Permodelan SVC lainnya ialah berupa reaktansi ekivalen  $X_{SVC}$  yang merupakan fungsi dari perubahan sudut penyalaan  $\alpha$ . Rangkaian reaktansi ekivalen ini terdiri atas *thyristor – controlled reactor* (TCR) dan reaktansi kapasitif tetap (*fixed capacitor*). Model ini memberikan informasi mengenai sudut penyalaan SVC yang diperlukan untuk mencapai tingkat kompensasi tertentu.

### 2.3.2. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

TCSC memiliki beberapa komponen yang mirip dengan TCR yaitu antara lain sebuah induktor yang seri dengan *thyristor bipolar*. Cara kerja thyristor adalah dengan melakukan pengaturan pada sudut penyalaannya sehingga didapatkan beberapa variasi reaktansi induktif yang menyebabkan pertukaran daya reaktif yang cepat antara TCSC dan sistem. TCSC dipasang paralel dengan sebuah kapasitor bank agar dapat mengkompensasi daya reaktif (Glanzmann & Andersson, 2004:142).

Pada prinsipnya TCSC dipasang secara seri dengan saluran transmisi. Pengaturan reaktansi saluran transmisi dapat dilakukan dengan mengendalikan reaktansi TCSC sehingga daya yang mengalir dapat ditingkatkan atau dengan kata lain peningkatan kapabilitas saluran transmisi. Pada Gambar 2.9 terlihat bahwa TCSC merupakan kombinasi

antara komponen TCR dengan kapasitor. TCR terdiri dari induktor yang terhubung seri dengan thyristor.



Gambar 2. 9. Rangkaian Sederhana TCSC Satu Fasa

Sumber : Acha, dkk. (2004:27)

Persamaan  $X_{eq}$  yang merupakan hasil dari sudut penyalan ditunjukkan sebagai berikut ini :

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (2-42)$$

$$B_C = \omega C \quad (2-43)$$

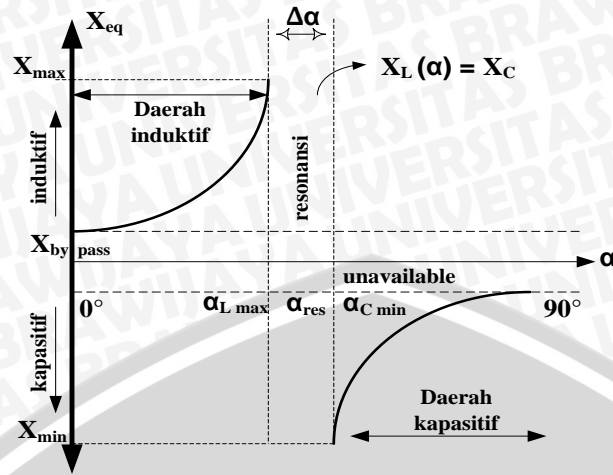
$$B_{eq} = B_L(\alpha) + \omega C \quad (2-44)$$

Dari persamaan diatas didapatkan persamaan  $X_{eq}$  untuk TCSC :

$$X_{eq} = -\frac{1}{B_L(\alpha) + B_C} \quad (2-45)$$

Dapat diketahui bahwa dalam pengoperasiannya, thyristor membutuhkan sudut penyalan. Sudut penyalan biasanya berkisar antara  $0^\circ$  hingga  $360^\circ$ . Akan tetapi berdasarkan referensi (Glanzmann & Andersson, 2004:143) sudut penyalan berkisar antara  $0^\circ$  hingga  $90^\circ$  sesuai dengan penjabaran kurva ekuivalen reaktansi TCSC pada Gambar 2.10.

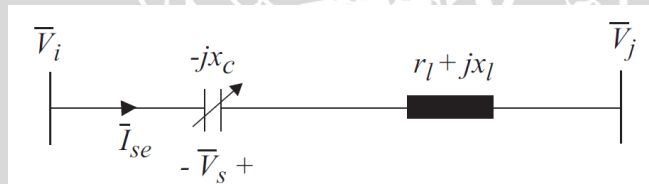




Gambar 2. 10. Reaktansi Ekvivalen ( $X_{eq}$ ) TCSC  
 Sumber : Glanzmann & Andersson(2004:143)

Dari gambar diatas, terlihat bahwa besar sudut penyalan thyristor adalah  $0^\circ$  dan  $90^\circ$ . Sudut penyalan dijaga pada jarak  $\Delta\alpha$  dari titik resonansi. Batas kompensasi maksimum TCSC ( $X_{max}$ ) ditentukan oleh sudut penyalan  $\alpha_{Lmax}$  dan untuk batas kompensasi minimum ( $X_{min}$ ) oleh sudut penyalan  $\alpha_{Cmin}$ . Untuk mencegah terjadinya kompensasi berlebihan, TCSC diatur pada daerah kerja antara  $-0,8X_{line}$  hingga  $0,2X_{line}$  (Jumaat dkk, 2012:146).

$$r_{TCSCmin} = -0,8 ; r_{TCSCmax} = 0,2$$



Gambar 2. 11. Model TCSC pada Saluran Transmisi  
 Sumber : Sadikovic (2006:20)

Dari Gambar 2.11. dapat diketahui hubungan antara rating TCSC dengan reaktansi pada saluran transmisi sebagai berikut :

$$X_{total} = X_{saluran} + X_{TCSC} \tag{2-46}$$

$$X_{TCSC} = r_{TCSC} \times X_{saluran} \tag{2-47}$$

Dimana:

$X_{saluran}$  = Reaktansi saluran transmisi

$r_{TCSC}$  = Rating kompensasi TCSC



## 2.4. Algoritma Genetika (*Genetic Algorithm*)

Menurut Gen & Cheng (1997) *Genetic Algorithm* (GA) termasuk dalam kelas algoritma pencarian yang menirukan proses evolusi alami. GA menggunakan kromosom untuk mengkodekan sebuah kemungkinan solusi. Sejumlah kromosom dalam populasi akan mengalami operasi rekombinasi (tukar silang dan mutasi) untuk membentuk generasi berikutnya. Setiap kromosom mempunyai nilai kebugaran (*fitness*) yang menentukan peluangnya untuk tetap bertahan hidup dalam generasi berikutnya. Dengan mekanisme seleksi ini diharapkan nilai *fitness* setiap kromosom akan meningkat pada setiap generasi. Pada akhir generasi, kromosom dengan nilai *fitness* terbaik akan diuraikan menjadi sebuah solusi. Solusi ini mungkin bukan merupakan solusi optimum tetapi fakta empirik membuktikan dengan menentukan parameter-parameter seperti ukuran populasi, *crossover rate* dan *mutation rate* yang sesuai, GA akan memberikan hasil yang memuaskan dalam waktu yang relatif cepat. (Mahmudy & Rahman, 2011:21).

Tahapan-tahapan yang terdapat pada GA yaitu (Suyanto, 2007:209) :

1. Representasi kromosom dan inisialisasi populasi
2. Dekode kromosom
3. Evaluasi fungsi
4. Elitisme
5. Seleksi orang tua
6. Pindah silang (*crossover*)
7. Mutasi (*mutation*)
8. Penggantian populasi
9. Kriteria penghentian

### 2.4.1. Representasi Kromosom dan Inisialisasi Populasi

Untuk dapat diproses menggunakan GA, suatu permasalahan harus dikonversi dulu ke dalam bentuk individu yang diwakili oleh satu atau lebih kromosom dengan kode tertentu. Pengkodean tersebut diwujudkan dalam gen-gen yang membentuk kromosom. Secara umum gen-gen tersebut direpresentasikan sebagai bilangan *real*, desimal, atau biner, yaitu (Suyanto, 2007:209) :

1. *Real number encoding*. Pada skema ini, nilai gen berada dalam interval  $[0,1]$ , atau lebih dikenal dengan istilah *Real-coded Genetic Algorithm*.



2. *Discrete decimal encoding*. Pada skema ini, setiap gen bisa berupa deretan bilangan bulat dalam interval [0,9].
3. *Binary encoding*. Setiap gen bisa berupa deretan nilai 0 atau 1. Biasa dikenal dengan istilah *Binary-coded Genetic Algorithm*.

#### 2.4.2. Dekode Kromosom

Setelah dibangkitkan sejumlah individu pada satu populasi langkah selanjutnya adalah melakukan dekode kromosom yaitu mengubah individu-individu tersebut ke dalam suatu nilai yang sebenarnya agar bisa dilakukan evaluasi fungsi.

Nilai yang didapat dari proses dekode kromosom pada *Real-coded Genetic Algorithm* (RGA) sesuai dengan persamaan (2-48) (Suyanto, 2005:7)

$$N = r_b + (r_a - r_b) \times g_i \quad (2-48)$$

Dimana  $g_i$  = nilai gen ke-i

$N$  = nilai sebenarnya

$r_b$  = Batas bawah

$r_a$  = Batas atas

#### 2.4.3. Evaluasi Fungsi

Fungsi evaluasi adalah sebuah persamaan fungsi yang memiliki peran untuk menghitung nilai *fitness* dari sebuah kromosom. Untuk mengevaluasi nilai *fitness* dari kromosom dilakukan langkah-langkah berikut (Mahmudy & Rahman, 2011:21):

- a. Ambil nilai real dari tiap individu dalam populasi
- b. Evaluasi nilai fungsi tujuan  $f(x)$ .
- c. Konversi nilai fungsi tujuan menjadi nilai *fitness*. Untuk masalah maksimasi nilai  $fitness=f(x)$ . Untuk masalah minimasi nilai  $fitness=z/f(x)$ ;  $z$  adalah sembarang bilangan bulat positif.

Semakin besar nilai *fitness* dari satu individu maka semakin baik pula solusi yang didapatkan dari individu tersebut. Nilai *fitness* ini digunakan untuk memilih  $n$  individu terbaik yang dipertahankan hidup pada generasi selanjutnya.

#### 2.4.4. Elitisme

Fungsi dari metode ini adalah mempertahankan individu terbaik untuk dimasukkan pada generasi berikutnya. Karena seleksi dilakukan secara acak, maka tidak ada jaminan bahwa suatu individu bernilai *fitness* tertinggi akan selalu terpilih. Selain itu, individu

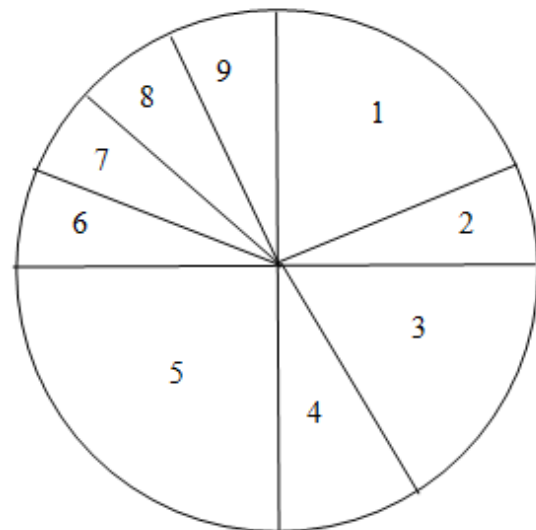
tersebut kemungkinan besar akan rusak oleh proses *crossover* dan mutasi. Sehingga untuk menjaga agar individu terbaik tidak hilang selama proses evolusi perlu dibuat satu atau dua *copy*nya.

#### 2.4.5. Seleksi

Seleksi akan menentukan individu-individu mana saja yang akan dipilih sebagai *parents* (orang tua) untuk dilakukan rekombinasi dan bagaimana *offspring* (anak) terbentuk dari individu-individu terpilih tersebut. Langkah pertama yang dilakukan dalam seleksi adalah pencarian nilai *fitness* dari setiap individu. Masing-masing individu dalam suatu wadah seleksi akan menerima probabilitas reproduksi yang tergantung pada nilai obyektif dirinya sendiri terhadap nilai obyektif dari semua individu dalam satu populasi. Nilai *fitness* inilah yang nantinya akan digunakan pada tahap-tahap seleksi berikutnya (Kusumadewi, 2005:235).

Salah satu metode seleksi yang umum digunakan adalah *roulette-wheel*. Sesuai dengan namanya, metode ini menirukan permainan *roulette-wheel* dimana masing-masing individu menempati potongan lingkaran pada roda *roulette* secara proporsional sesuai dengan nilai *fitness*-nya. Gambar 2.12 di bawah mengilustrasikan sebuah contoh penggunaan metode *roulette-wheel* (Suyanto, 2007:211).

String	Nilai <i>Fitness</i>
S1	0.6
S2	0.2
S3	0.6
S4	0.2
S5	0.8
S6	0.2
S7	0.2
S8	0.2
S9	0.2
JUMLAH	3.2



Gambar 2. 12. Model seleksi *roulette-wheel*  
Sumber : Suyanto (2007:211)



#### 2.4.6. Pindah Silang (*Crossover*)

Setelah terpilih dua individu sebagai *parents* dari proses seleksi maka akan dilakukan proses *crossover* untuk menghasilkan *offspring*. Proses ini akan menyilangkan sebagian gen dari satu individu dengan sebagian gen dari individu yang lain. Tentunya tidak semua individu akan melakukan *crossover*. Banyaknya jumlah individu yang melakukan *crossover* sesuai dengan nilai probabilitas *crossover* ( $P_c$ ). Pada umumnya nilai  $P_c$  diatur mendekati 1 (Suyanto, 2005:13).

Salah satu operator *crossover* yang digunakan dalam metode RGA adalah *arithmetic crossover method*. Jika *parents* dinyatakan dengan persamaan :

$$\begin{aligned} C_1 &= (c_1^1, \dots, c_n^1), \\ C_2 &= (c_1^2, \dots, c_n^2) \end{aligned} \quad (2-49)$$

maka *offspring* yang akan dihasilkan dari *arithmetic crossover method* adalah

$$\begin{aligned} y_i^{(1)} &= \alpha c_i^{(1)} + (1 - \alpha) c_i^{(2)}, \\ y_i^{(2)} &= \alpha c_i^{(2)} + (1 - \alpha) c_i^{(1)} \end{aligned} \quad (2-50)$$

Dimana  $\alpha$  adalah bilangan random pada interval  $[0,1]$  (Herrera, 1998:288).

#### 2.4.7. Mutasi (*Mutation*)

Mutasi digunakan untuk menjaga diversitas dari kromosom sehingga terhindar dari konvergensi dini. Dalam proses mutasi tidak memandang kromosom, melainkan gen-gen dalam kromosom. Probabilitas mutasi akan menentukan gen-gen dari suatu populasi yang akan mengalami proses mutasi. Mutasi adalah proses mengganti nilai gen sebelumnya dengan nilai baru yang ditentukan secara acak dalam range yang ditentukan sebelumnya.

Proses mutasi diatur oleh probabilitas mutasi ( $P_m$ ). Sehingga hanya  $P_m \times N$  kromosom dalam populasi dan  $P_m \times$  jumlah gen dalam kromosom yang akan mengalami mutasi.

#### 2.4.8. Penggantian Populasi

Terdapat dua jenis penggantian populasi, yaitu (Suyanto, 2007:214) :

- a. *Generational replacement*, yaitu dengan mengganti  $N$  individu pada suatu generasi dengan  $N$  individu baru hasil pindah silang dan mutasi. Untuk mempertahankan individu terbaik diperlukan elitisme.

- b. *Steady-state*, yaitu dengan membandingkan *offspring* dengan *parents*. Jika *offspring* memiliki *fitness* yang lebih baik daripada salah satu atau kedua *parents* maka *offspring* akan menggantikan *parents* yang memiliki *fitness* terendah.

#### 2.4.9. Kriteria Penghentian

Terdapat berbagai macam kriteria penghentian yang bisa digunakan, tiga diantaranya adalah :

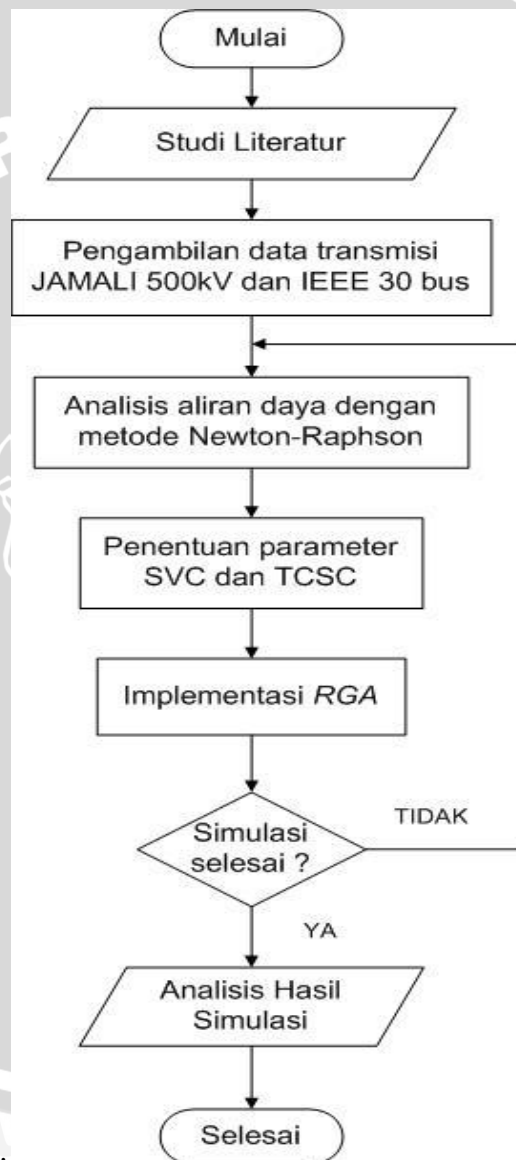
- a. memberikan batasan jumlah iterasi. Apabila batas iterasi tersebut dicapai, iterasi dihentikan dan laporkan individu bernilai *fitness* tertinggi sebagai solusi terbaik.
- b. memberikan batasan waktu proses GA. Kriteria ini digunakan pada sistem-sistem waktu nyata (*real time system*), dimana solusi harus ditemukan paling lama misalkan 3 menit. Dengan demikian proses eksekusi bisa dihentikan ketika proses sudah berlangsung selama 3 menit.
- c. menghitung kegagalan penggantian anggota populasi yang terjadi secara berurutan sampai jumlah tertentu. Misalkan, setelah 100 iterasi tidak ada penggantian individu dalam populasi karena individu anak dihasilkan selalu memiliki nilai *fitness* yang lebih rendah daripada orangtuanya. Dalam kondisi seperti ini, kita bisa menghentikan iterasi.



### BAB III

#### METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, SVC dan TCSC ditempatkan pada sistem kelistrikan JAMALI 500 kV. Penempatan SVC dan TCSC akan dioptimasi menggunakan metode RGA. Metode penelitian yang digunakan secara umum tersusun seperti pada Gambar 3.1



Gambar 3. 1. Diagram Alir Metode Penelitian



### 3.1. Pengambilan Data

Penelitian ini dilakukan pada sistem tenaga listrik Jawa Madura Bali 500 kV dan sistem standart IEEE 30 bus sebagai validasi. Data yang digunakan berupa data sekunder yang diambil dari tugas akhir Gugun Supriatna Dwi Jatnika yang berjudul Optimasi Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali dengan Aliran Daya Optimal Metode MINOPF pada tahun 2013 yang bersumber dari PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (Supriatna, 2013:35). Data sekunder yang didapatkan meliputi:

1. *Single line diagram*
2. Data saluran transmisi
3. Data pembangkitan dan pembebanan

Dari data-data yang diperoleh, maka akan dilakukan pengolahan data. Dari data *single line diagram*, bus-bus yang ada akan diklasifikasikan menjadi *slack bus*, bus generator, atau bus beban.

### 3.2. Analisis Aliran Daya

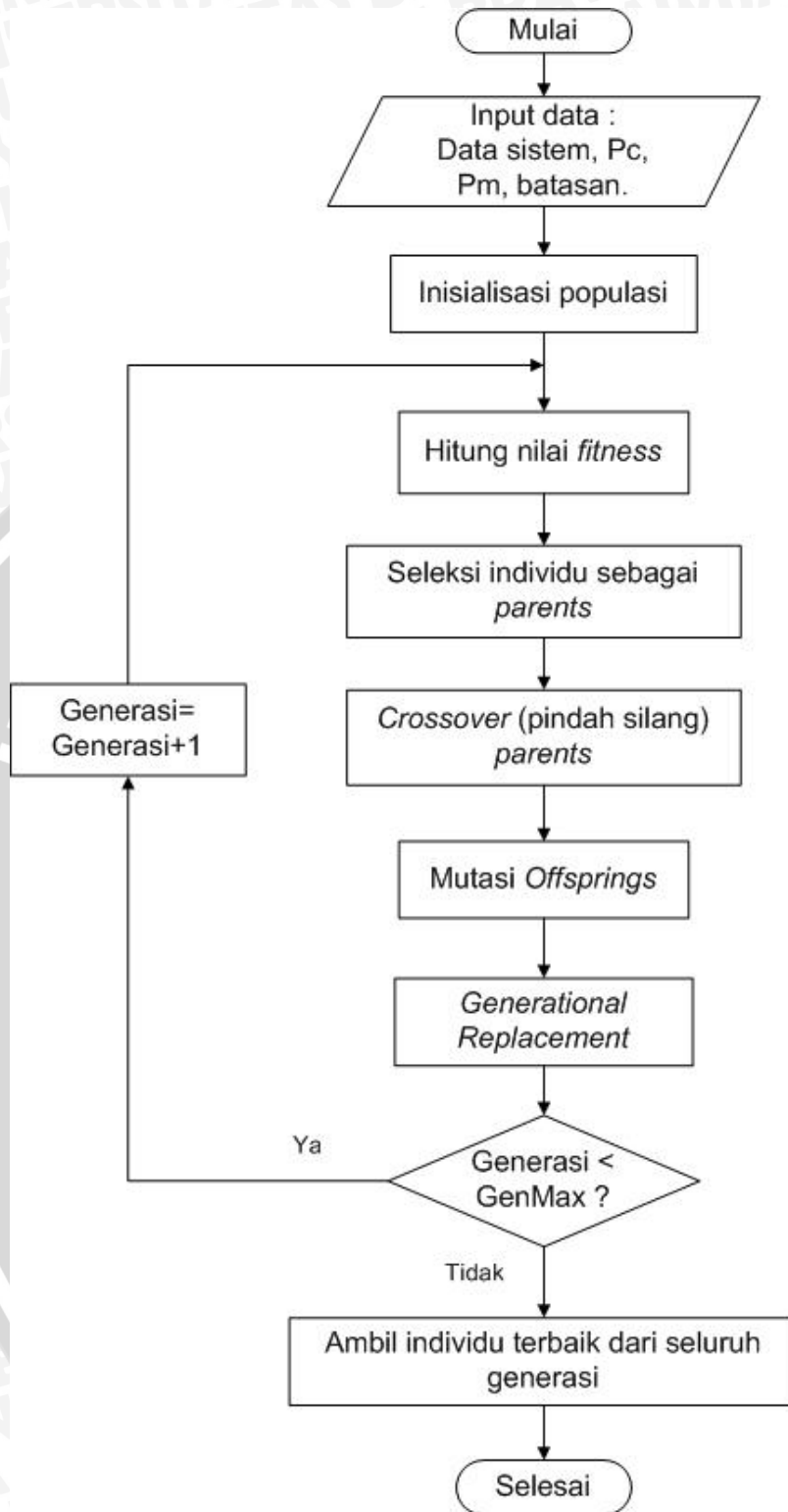
Setelah studi literatur dan pengambilan data selesai dikerjakan, tahap selanjutnya adalah menganalisis data – data tersebut dan dievaluasi dalam suatu *load flow* dengan menggunakan metode Newton-Raphson. Analisis ini bertujuan untuk menentukan bus dengan tegangan terendah, yang kemudian dengan menggunakan RGA untuk menentukan lokasi penempatan SVC dan TCSC yang tepat untuk mengoptimalkan aliran daya pada sistem.

### 3.3. Penentuan Parameter SVC dan TCSC

Pada penelitian ini digunakan 3 buah SVC dan 3 buah TCSC. Untuk SVC masing-masing berkapasitas antara 0 MVAR sampai 250 MVAR dan tegangan 69 kV. Sementara untuk rating dari TCSC adalah  $-0.8X_{line}$  sampai  $0.2X_{line}$ . Peralatan ini memberikan kontrol daya reaktif dengan menyerap maupun menginjeksinya daya reaktif pada sistem secara dinamis.

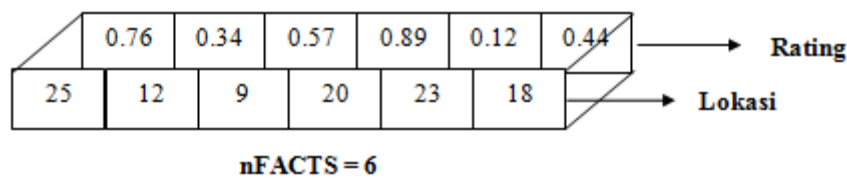
### 3.4. Implementasi RGA untuk Penempatan SVC dan TCSC

Metode RGA digunakan untuk menentukan lokasi dan kapasitas optimal dari SVC dan TCSC untuk meminimalisasi rugi daya yang terjadi sekaligus memperbaiki level tegangan yang tidak sesuai dengan standard yang ditentukan. Diagram alir untuk RGA ditunjukkan pada gambar 3.2 dibawah.



Gambar 3. 2. Diagram alir RGA

Konfigurasi individu FACTS *devices* terdiri dari 2 parameter yaitu lokasi dan rating. Konfigurasi untuk setiap individu dapat dilihat pada gambar 3.3.



Gambar 3. 3. Konfigurasi individu FACTS *devices*  
 Sumber : Robandi (2006:280)

Setiap individu mempunyai dua string kromosom. String pertama bernilai integer menyatakan lokasi dari FACTS. String ini membawa gen-gen yang berisi informasi lokasi yang akan dipasang FACTS. Lokasi yang dimaksud merupakan nomer bus untuk pemasangan SVC dan nomer saluran untuk pemasangan TCSC. Sedangkan string kedua berupa bilangan *real* yang nilainya 0 sampai 1. String ini menyatakan rating dari FACTS *devices*.

### 3.5. Penentuan Parameter RGA

Parameter yang digunakan di dalam metode *Genetic Algorithm* secara umum yaitu ukuran populasi (*popsi*), maksimum generasi (MaxG), probabilitas *crossover* (Pc), dan probabilitas mutasi (Pm). Pada penelitian ini nilai parameter yang akan digunakan di tunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3. 1. Parameter RGA

<i>Popsi</i>	20			
MaxG	30			
Pc	0,6	0,6	0,8	0,8
Pm	0,05	0,1	0,05	0,1

Parameter Pc dan Pm masing-masing nantinya akan dilakukan metode *trial and error* untuk mendapatkan kombinasi nilai Pc dan Pm terbaik yang mempunyai nilai *fitness* tertinggi. Sedangkan untuk parameter *popsi* dan MaxG telah ditetapkan nilainya. Semakin besar nilai *popsi* dan MaxG yang digunakan maka semakin baik solusi yang didapat, tetapi akan mengakibatkan waktu pencarian semakin lama.

### 3.6. Analisis Hasil Simulasi

Simulasi digunakan untuk mendapatkan lokasi dan rating yang optimal dari FACTS *devices* pada sistem tenaga listrik JAMALI 500 kV dan sistem standart IEEE 30 bus menggunakan metode RGA. Setelah dilakukan simulasi pada sistem dengan pembebanan 100% dan 80% selanjutnya dilakukan analisis terhadap hasil simulasi.



Adapun analisis yang akan dilakukan meliputi:

1. Aliran daya pada sistem sebelum penempatan FACTS *devices*.
2. Aliran daya pada sistem setelah penempatan SVC dan TCSC.
3. Perbandingan aliran daya pada sistem sebelum dan setelah penempatan SVC dan TCSC
4. Perubahan rugi daya dari setiap generasi pada optimasi menggunakan RGA.

Analisis aliran daya diatas dimaksudkan untuk mengetahui rugi daya dan tegangan masing-masing bus pada sistem.

### 3.7. Pengambilan Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori dan analisis hasil simulasi metode RGA untuk optimasi penempatan dan rating FACTS *devices*. Pemberian saran juga dilakukan kepada pembaca yang akan melakukan studi terkait dengan skripsi ini. Meliputi hal-hal yang menjadi kendala dalam penelitian ini atau hal-hal yang masih memerlukan kajian lebih dalam lagi.



## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini simulasi dilakukan dengan menggunakan dua data, yaitu data real sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV dan data sistem standar IEEE 30 bus sebagai validasi. Pengujian dilakukan pada sistem dengan pembebanan 100% dan 80%.

Pada masing pembebanan akan dilakukan beberapa pengujian pada sistem yaitu sistem tanpa pemasangan kompensator, dan sistem dengan penempatan SVC-TCSC yang dioptimasi menggunakan RGA. Jumlah FACTS *devices* yang digunakan masing-masing 3 buah. Setelah dilakukan simulasi selanjutnya akan dilakukan analisis dari masing-masing hasil simulasi.

#### 4.1. Data Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali 500 kV

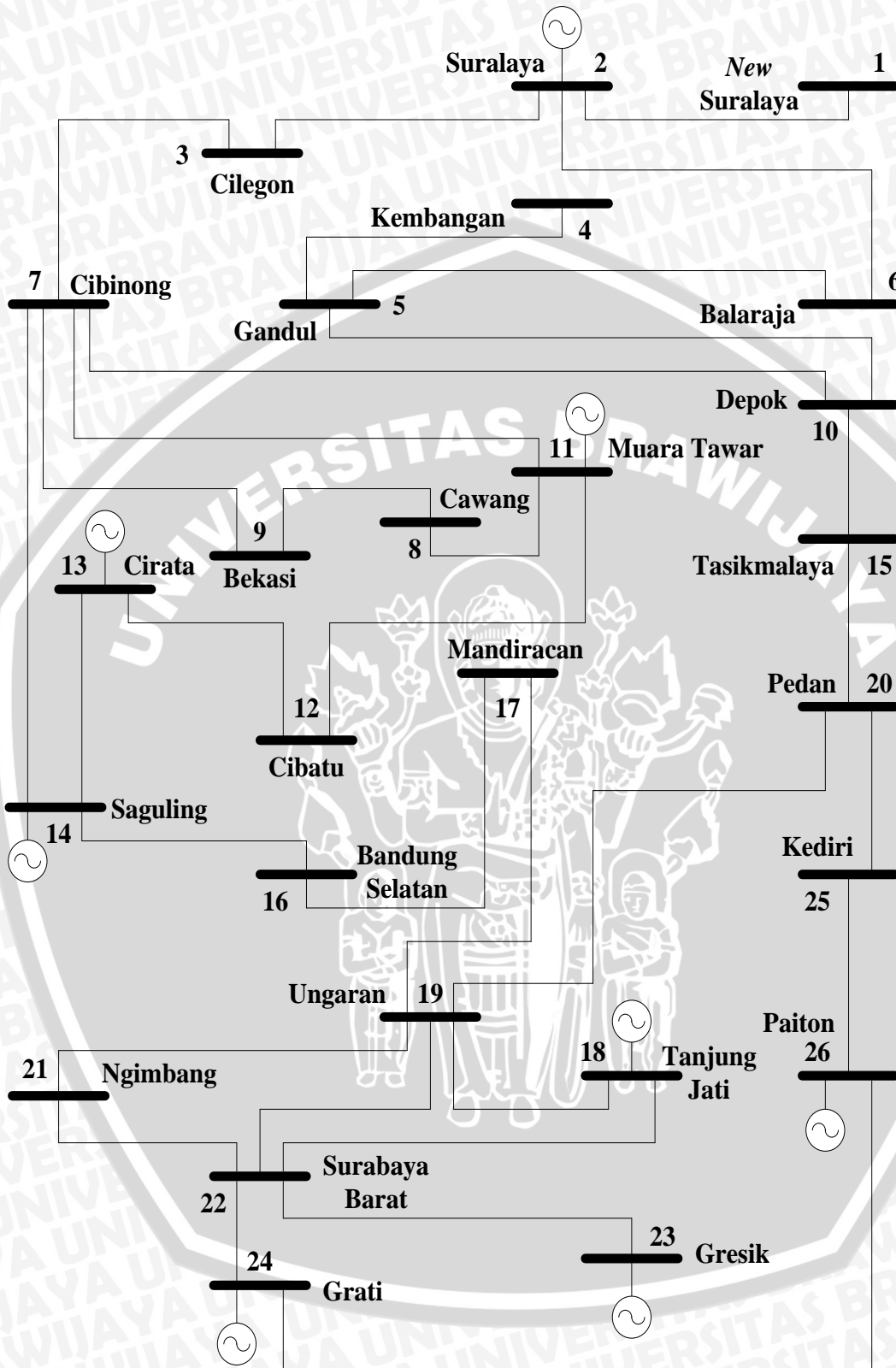
Sistem transmisi yang digunakan untuk skripsi ini adalah sistem transmisi Jawa – Bali 500 kV yang diambil pada tanggal 7 Mei 2013 yang bersumber dari PT PLN (Persero). Data sistem transmisi yang digunakan terdiri atas 26 bus, 31 saluran, dan 8 pusat pembangkit yang terhubung ke bus-bus beban melalui saluran transmisi. Data ini diambil dari tugas akhir Gugun Supriatna Dwi Jatnika tahun 2013. Bus-bus tersebut diklasifikasikan dalam tabel 4.1.

Tabel 4. 1. Jenis Bus pada Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali 500 kV

Jenis Bus	Nama Bus	Jumlah Bus
Slack Bus	Suralaya	1
Bus Beban	New Suralaya, Cilegon, Kembangan, Gandul, Balaraja, Cibinong, Cawang, Bekasi, Depok, Cibatu, Tasikmalaya, Bandung Selatan, Mandicaran, Ungaran, Pedan, Ngimbang, Surabaya Barat, dan Kediri	18
Bus Generator	Muara Tawar, Cirata, Saguling, Tanjung Jati, Gresik, Grati, dan Paiton	7
Jumlah		26

Sumber : PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)

Bus-bus pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV digambarkan pada suatu *Single line diagram* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. *Single Line Diagram* Sistem Jawa-Bali 500 kV  
 Sumber: PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)





#### 4.1.1. Data Saluran

Data saluran sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV yang digunakan pada skripsi ini berjumlah 31 saluran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2. Data Saluran Sistem Transmisi Jawa-Bali 500 kV

Saluran			R (p.u)	X(p.u)	1/2 B (p.u)	Tap Setting
No	Dari	Ke				
1	2	1	0,00015	0,00141	0,005683815	1
2	2	3	0,00063	0,00701	0,001141429	1
3	2	6	0,00368	0,03533	0,000226416	1
4	3	7	0,01313	0,14693	0,000054450	1
5	5	4	0,00151	0,01693	0,000472621	1
6	5	6	0,00298	0,02862	0,000279497	1
7	7	14	0,00411	0,04600	0,000173931	1
8	9	7	0,00444	0,04268	0,000187462	1
9	9	8	0,00197	0,01896	0,000421900	1
10	10	5	0,00035	0,00335	0,002399031	1
11	10	7	0,00091	0,00877	0,000912626	1
12	11	7	0,00621	0,05968	0,000134053	1
13	11	8	0,00563	0,05405	0,000148017	1
14	12	11	0,00282	0,02711	0,000295063	1
15	12	13	0,00274	0,02618	0,000305545	1
16	14	13	0,00147	0,01417	0,000564635	1
17	14	16	0,00196	0,02190	0,000365257	1
18	15	10	0,01406	0,15725	0,000050875	1
19	17	16	0,00699	0,06717	0,000119108	1
20	17	19	0,01348	0,12949	0,000061781	1
21	19	18	0,00677	0,07570	0,000105675	1
22	19	20	0,00904	0,08681	0,000092151	1
23	19	21	0,02348	0,22558	0,000035464	1
24	20	15	0,01531	0,17129	0,000046706	1
25	21	22	0,00597	0,05740	0,000139362	1
26	22	19	0,02979	0,28623	0,000027950	1
27	22	24	0,00399	0,04460	0,000179386	1
28	23	22	0,00140	0,01346	0,000594543	1
29	25	20	0,01029	0,11513	0,000069488	1
30	26	24	0,00422	0,04718	0,000169547	1
31	26	25	0,01029	0,11513	0,000069488	1

Sumber: PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)

#### 4.1.2. Data Pembebanan

Untuk data pembebanan sisten tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV ditunjukkan pada Tabel 4.3 seperti yang ditunjukkan dibawah ini.

Tabel 4. 3. Data Beban Sistem Jawa-Bali 500 kV

No. Bus	Nama Bus	Kode Bus	Tegangan (p.u)		Pembebanan	
			Magnitude	Degree	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
1	New Suralaya	2	1,000	0,000	86,000	34,000
2	Suralaya	1	1,020	0,000	142,000	-56,000
3	Cilegon	0	1,000	0,000	320,000	-139,000
4	Kembangan	0	1,000	0,000	676,000	213,000
5	Gandul	0	1,000	0,000	727,000	47,000
6	Balaraja	0	1,000	0,000	636,000	253,000
7	Cibinong	0	1,000	0,000	473,000	350,000
8	Cawang	0	1,000	0,000	343,000	97,000
9	Bekasi	0	1,000	0,000	1.097,000	79,000
10	Depok	0	1,000	0,000	536,000	166,000
11	Muara Tawar	2	1,000	0,000	0,000	0,000
12	Cibatu	0	1,000	0,000	666,000	463,000
13	Cirata	2	1,000	0,000	650,000	270,000
14	Saguling	2	1,000	0,000	0,000	0,000
15	Tasikmalaya	0	1,000	0,000	137,000	48,000
16	Bandung Selatan	0	1,000	0,000	505,000	325,000
17	Mandikaran	0	1,000	0,000	339,000	3,000
18	Tanjung Jati	2	1,025	0,000	380,000	96,000
19	Ungaran	0	1,000	0,000	838,000	382,000
20	Pedan	0	1,000	0,000	631,000	430,000
21	Ngimbang	0	1,000	0,000	262,000	43,000
22	Surabaya Barat	0	1,000	0,000	983,000	642,000
23	Gresik	2	1,025	0,000	146,000	21,000
24	Grati	2	1,000	0,000	430,000	205,000
25	Kediri	0	1,000	0,000	605,000	197,000
26	Paiton	2	1,000	0,000	593,000	144,000

Sumber: PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)



Kode bus pada Tabel 4.3 merepresentasikan jenis bus pada sistem. Pada kolom kode bus angka 1 merupakan kode untuk *slack* bus, 2 untuk bus generator atau bus pembangkit, dan 3 untuk bus beban.

#### 4.1.3. Data Pembangkitan

Pada sistem Jawa-Bali 500 kV terdapat 8 pembangkit, adapun data daya pembangkitan oleh masing-masing pembangkit ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4. 4. Data Pembangkitan sistem Jawa-Bali 500 kV

No.	Nama Pembangkit	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
1	Suralaya	2.962	1.554
2	Muaratawar	1.351	703
3	Tanjung Jati	2.385	336
4	Gresik	590	111
5	Paiton	3.025	551
6	Grati	325	44
7	Cirata	365	120
8	Saguling	647	135
<b>Total</b>		<b>11.650</b>	<b>3.554</b>

Sumber : PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)

#### 4.2. Aliran Daya Sistem Tenaga Listrik Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi

Pada penelitian ini digunakan metode Newton-Raphson untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya. Fungsi dari aliran daya adalah untuk mengetahui nilai tegangan masing-masing bus dan besar rugi daya pada saluran transmisi.

Penyelesaian aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson didasarkan pada:

1. Tegangan dasar = 500 kV
2. Daya dasar = 1000 MVA
3. Akurasi = 0,0001
4. Maksimum iterasi = 200

##### 4.2.1. Aliran Daya Sistem Jawa-Bali 500 kV pada Pembebanan 100%

Setelah dilakukan aliran daya (*load flow*) pada sistem Jawa-Bali 500 kV dengan pembebanan 100% menggunakan metode Newton-Raphson, diperoleh hasil aliran daya sebelum dilakukan kompensasi ditunjukkan pada tabel 4.5.



Tabel 4. 5. Hasil *Load Flow* Sistem Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 100%

No. Bus	Tegangan (p.u)		Beban		Pembangkitan		Injeksi
	Magnitude	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1,020	-0,006	86,000	34,000	0,000	0,000	0,000
2	1,020	0,000	142,000	-56,000	3.662,486	1.076,712	0,000
3	1,018	-0,436	320,000	-139,000	0,000	0,000	0,000
4	0,960	-7,866	676,000	213,000	0,000	0,000	0,000
5	0,965	-7,179	722,000	47,000	0,000	0,000	0,000
6	0,983	-4,437	636,000	253,000	0,000	0,000	0,000
7	0,968	-7,235	473,000	350,000	0,000	0,000	0,000
8	0,971	-8,826	343,000	97,000	0,000	0,000	0,000
9	0,967	-9,210	1.097,000	79,000	0,000	0,000	0,000
10	0,965	-7,222	536,000	166,000	0,000	0,000	0,000
11	0,990	-6,682	0,000	0,000	1.351,000	1.032,783	0,000
12	0,978	-7,361	666,000	463,000	0,000	0,000	0,000
13	0,980	-7,056	650,000	270,000	365,000	736,034	0,000
14	0,975	-6,607	0,000	0,000	647,000	461,005	0,000
15	0,920	-3,927	137,000	48,000	0,000	0,000	0,000
16	0,959	-6,417	505,000	325,000	0,000	0,000	0,000
17	0,937	-3,742	339,000	3,000	0,000	0,000	0,000
18	0,950	14,544	380,000	96,000	2.385,000	579,464	0,000
19	0,911	4,659	838,000	382,000	0,000	0,000	0,000
20	0,887	1,579	631,000	430,000	0,000	0,000	0,000
21	0,945	6,553	262,000	43,000	0,000	0,000	0,000
22	0,959	7,946	983,000	642,000	0,000	0,000	0,000
23	0,970	8,248	146,000	21,000	590,000	787,628	0,000
24	0,975	10,992	430,000	205,000	325,000	742,781	0,000
25	0,906	6,071	605,000	197,000	0,000	0,000	0,000
26	0,970	14,616	593,000	144,000	3.025,000	488,174	0,000
<b>Total</b>			<b>12.196,000</b>	<b>4.313,000</b>	<b>12.350,486</b>	<b>5.904,582</b>	<b>0,000</b>

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.5 hasil *load flow* sistem tenaga listrik Jawa-Bali 500 kV sebelum pemasangan kompensator pada pembebanan 100% diperoleh nilai tegangan setiap bus. Jika mengacu pada standar SPLN dimana batas nilai tegangan yaitu  $1 \pm 5\%$  p.u atau  $0.95 \leq V_{bus} \leq 1.05$ , maka ada 6 bus yang mempunyai nilai tegangan di luar batas standar. Bus-bus dengan tegangan di luar batas standar tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4. 6. Bus-bus dengan Tegangan di Bawah Standar pada Sistem Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 100%

No. Bus	Nama Bus	Tegangan (p.u)	Kondisi
15	Tasikmalaya	0,920	<i>Undervoltage</i>
17	Mandicaran	0,937	<i>Undervoltage</i>
19	Ungaran	0,911	<i>Undervoltage</i>
20	Pedan	0,887	<i>Undervoltage</i>
21	Ngimbang	0,945	<i>Undervoltage</i>
25	Kediri	0,906	<i>Undervoltage</i>

Sedangkan untuk rugi-rugi daya pada saluran ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4. 7. Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 100%

No. Saluran	Saluran		Rugi-rugi Daya	
	Dari	Ke	Aktif (MW)	Reaktif (MVAR)
1	2	1	0,001	-11,815
2	2	3	0,809	6,677
3	2	6	21,570	206,775
4	3	7	9,869	110,304
5	5	4	0,824	8,339
6	5	6	8,898	84,933
7	7	14	0,309	3,127
8	9	7	2,686	25,455
9	9	8	0,306	2,146
10	10	5	0,024	-4,241
11	10	7	0,130	-0,456
12	11	7	0,977	9,131
13	11	8	3,236	30,805
14	12	11	1,098	9,976
15	12	13	0,130	0,654
16	14	13	0,608	4,763
17	14	16	1,109	11,720
18	15	10	2,811	31,357
19	17	16	3,756	35,875
20	17	19	15,088	144,856
21	19	18	31,896	356,640
22	19	20	3,422	32,728
23	19	21	0,975	9,303



No. Saluran	Saluran		Rugi-rugi Daya	
	Dari	Ke	Aktif (MW)	Reaktif (MVAR)
24	20	15	4,438	49,567
25	21	22	1,285	12,097
26	22	19	1,863	17,850
27	22	24	5,779	64,320
28	23	22	1,170	10,131
29	25	20	4,073	45,448
30	26	24	7,156	79,737
31	26	25	18,191	203,385
<b>Total</b>			<b>154,486</b>	<b>1.591,583</b>

Sumber : Hasil Perhitungan

Sementara dari Tabel 4.6 dapat diketahui rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Rugi daya aktif dan reaktif pada sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV sebelum pemasangan kompensator pada pembebanan 100% masing-masing sebesar 154,4859 MW dan 1591,5834 MVAR.

#### 4.2.2. Aliran Daya Sistem Jawa-Bali 500 kV pada Pembebanan 80%

Perhitungan aliran daya (*load flow*) selanjutnya dilakukan pada pembebanan rata-rata atau 80% dari beban puncak menggunakan metode Newton-Raphson. Hasil aliran daya ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4. 8. Hasil *Load Flow* Sistem Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 80%

No. Bus	Tegangan (p.u)		Beban		Pembangkitan		Injeksi
	Magnitude	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1,020	-0,005	68,800	27,200	0,000	0,000	0,000
2	1,020	0,000	113,600	-44,800	2.900,684	818,601	0,000
3	1,018	-0,345	256,000	-111,200	0,000	0,000	0,000
4	0,973	-6,145	540,800	170,400	0,000	0,000	0,000
5	0,977	-5,608	577,600	37,600	0,000	0,000	0,000
6	0,991	-3,487	508,800	202,400	0,000	0,000	0,000
7	0,978	-5,645	378,400	280,000	0,000	0,000	0,000
8	0,983	-6,902	274,400	77,600	0,000	0,000	0,000
9	0,980	-7,198	877,600	63,200	0,000	0,000	0,000
10	0,976	-5,639	428,800	132,800	0,000	0,000	0,000
11	1,000	-5,235	0,000	0,000	1.080,800	1.157,738	0,000
12	0,984	-5,731	532,800	370,400	0,000	0,000	0,000



No. Bus	Tegangan (p.u)		Beban		Pembangkitan		Injeksi
	Magnitude	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
13	0,980	-5,450	520,000	216,000	292,000	435,122	0,000
14	0,975	-5,084	0,000	0,000	517,600	7,466	0,000
15	0,946	-3,009	109,600	38,400	0,000	0,000	0,000
16	0,964	-4,934	404,000	260,000	0,000	0,000	0,000
17	0,953	-2,857	271,200	2,400	0,000	0,000	0,000
18	0,980	10,846	304,000	76,800	1.908,000	505,142	0,000
19	0,944	3,481	670,400	305,600	0,000	0,000	0,000
20	0,926	1,206	504,800	344,000	0,000	0,000	0,000
21	0,963	4,925	209,600	34,400	0,000	0,000	0,000
22	0,972	6,005	786,400	513,600	0,000	0,000	0,000
23	0,980	6,247	116,800	16,800	472,000	553,332	0,000
24	0,985	8,367	344,000	164,000	260,000	393,084	0,000
25	0,942	4,600	484,000	157,600	0,000	0,000	0,000
26	0,990	11,112	474,400	115,200	2.420,000	538,560	0,000
<b>Total</b>			<b>9.759,800</b>	<b>3.450,400</b>	<b>9.851,084</b>	<b>4.409,045</b>	<b>0,000</b>

Sumber : Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.8 diatas dapat diketahui tegangan pada masing-masing bus dan total daya yang dibangkitkan oleh generator. Jika mengacu pada standar SPLN maka terdapat empat bus yang mempunyai tegangan di bawah batas standar. Bus-bus dengan tegangan dibawah standar tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.9. Sedangkan untuk total daya yang dibangkitkan oleh generator adalah sebesar 9.851,084 MW dan 4.409,045 MVAR.

Tabel 4. 9. Bus-bus dengan Tegangan di Bawah Standar pada Sistem Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 80%

No. Bus	Nama Bus	Tegangan (p.u)	Kondisi
15	Tasikmalaya	0,946	<i>Undervoltage</i>
19	Ungaran	0,944	<i>Undervoltage</i>
20	Pedan	0,926	<i>Undervoltage</i>
25	Kediri	0,942	<i>Undervoltage</i>

Sementara untuk aliran daya dan rugi-rugi daya yang timbul pada saluran transmisi ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4. 10. Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi Jawa-Bali 500 kV Sebelum Optimasi pada Pembebanan 80%

No. Saluran	Saluran		Rugi-rugi Daya	
	Dari	Ke	MW	MVAR
1	2	1	0,001	-11,820
2	2	3	0,506	3,286
3	2	6	13,386	128,152
4	3	7	6,115	68,300
5	5	4	0,514	4,849
6	5	6	5,489	52,175
7	7	14	0,199	1,889
8	9	7	1,701	15,986
9	9	8	0,214	1,239
10	10	5	0,015	-4,433
11	10	7	0,052	-1,248
12	11	7	0,895	8,332
13	11	8	2,120	20,075
14	12	11	1,247	11,395
15	12	13	0,156	0,903
16	14	13	0,466	3,395
17	14	16	0,484	4,724
18	15	10	1,610	17,913
19	17	16	2,034	19,320
20	17	19	8,824	84,670
21	19	18	19,422	217,077
22	19	20	2,017	19,216
23	19	21	0,444	4,197
24	20	15	2,669	29,781
25	21	22	0,731	6,763
26	22	19	0,933	8,908
27	22	24	3,566	39,552
28	23	22	0,605	4,677
29	25	20	2,550	28,411
30	26	24	4,251	47,230
31	26	25	11,072	123,733
<b>Total</b>			<b>94,284</b>	<b>958,645</b>

Sumber : Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.10 dapat dilihat aliran daya serta rugi-rugi daya pada saluran sistem transmisi Jawa-Bali 500 kV sebelum Optimasi pada pembebanan 80%. Rugi daya aktif sistem sebesar 94,284 MW dan rugi daya reaktif sistem sebesar 958,645 MVAR. Total rugi daya aktif dan reaktif sistem pada pembebanan 80% lebih kecil dibandingkan pada pembebanan 100% dikarenakan sesuai dengan persamaan (2-9) jika daya beban lebih kecil



maka arus yang mengalir pada saluran lebih kecil, sehingga aliran daya dan rugi-rugi daya pada saluran lebih kecil sesuai dengan persamaan (2-13) sampai persamaan (2-15).

#### 4.3. Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV

Pada simulasi ini dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC pada sistem Jawa-Bali 500 kV menggunakan metode *Real-coded Genetic Algorithm* (RGA). Pada simulasi ini menggunakan 3 buah SVC yang berkapasitas 0 sampai 250 MVAR, dan 3 buah TCSC dengan rating  $-0,8X_{sal}$  sampai  $0,2X_{sal}$ . Sistem diuji pada dua kondisi pembebanan yaitu sistem dengan pembebanan 100% dan pembebanan 80%. Selanjutnya akan dilakukan analisa pada sistem sebelum dan sesudah penempatan SVC dan TCSC pada dua kondisi pembebanan.

Sebelum melakukan simulasi untuk optimasi penempatan SVC dan TCSC terlebih dahulu dilakukan pengujian parameter RGA untuk mendapatkan nilai probabilitas crossover ( $P_c$ ) dan probabilitas mutasi ( $P_m$ ) yang terbaik. Pengujian dilakukan pada sistem dengan pembebanan 100%. Ukuran populasi (*popsize*) yang digunakan sebanyak 20 dan maksimum generasi ( $MaxG$ ) yang digunakan adalah 30 generasi. Parameter yang akan digunakan pada simulasi ini adalah parameter yang dapat menghasilkan rugi daya aktif paling kecil. Hasil pengujian parameter RGA untuk simulasi penempatan SVC dan TCSC ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4. 11. Hasil Pengujian Parameter RGA untuk Optimasi Penempatan SVC dan TCSC

<b>Parameter RGA</b>	<b>Pc</b>	0,60	0,60	0,80	0,80
	<b>Pm</b>	0,05	0,10	0,05	0,10
<b>Ploss (MW)</b>		138,7327	139,0572	138,2639	137,8739

Dari Tabel 4.11 dapat diambil kesimpulan bahwa parameter yang menghasilkan rugi daya aktif paling kecil didapat dari pengujian keempat, dimana rugi daya aktif yang dihasilkan dari parameter itu sebesar 137,8739 MW. Sehingga pada simulasi untuk optimasi penempatan SVC dan TCSC pada sistem Jawa-Bali 500 kV digunakan parameter dengan nilai  $P_c$  0,8 dan nilai  $P_m$  0,1.

##### 4.3.1. Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV dengan Pembebanan 100%

Hasil simulasi untuk optimasi penempatan SVC dan TCSC pada sistem Jawa-Bali 500 kV dengan pembebanan 100% menggunakan metode RGA ditunjukkan pada Tabel 4.12.



Tabel 4. 12. Hasil Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV dengan Pembebanan 100%

No. Bus	Tegangan		Beban		Pembangkitan		Injeksi
	Magnitude	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1,020	-0,006	86,000	34,000	0,000	0,000	0,000
2	1,020	0,000	142,000	-56,000	3.646,032	859,830	0,000
3	1,018	-0,433	320,000	-139,000	0,000	0,000	0,000
4	0,970	-7,825	676,000	213,000	0,000	0,000	0,000
5	0,975	-7,152	722,000	47,000	0,000	0,000	0,000
6	0,988	-4,435	636,000	253,000	0,000	0,000	0,000
7	0,977	-7,120	473,000	350,000	0,000	0,000	0,000
8	0,981	-8,626	343,000	97,000	0,000	0,000	0,000
9	0,977	-9,020	1.097,000	-79,000	0,000	0,000	0,000
10	0,975	-7,197	536,000	166,000	0,000	0,000	0,000
11	1,000	-6,477	0,000	0,000	1.351,000	1.262,256	0,000
12	0,983	-7,039	666,000	463,000	0,000	0,000	0,000
13	0,980	-6,631	650,000	270,000	365,000	551,400	0,000
14	0,975	-6,141	0,000	0,000	647,000	45,427	0,000
15	0,984	-5,805	137,000	48,000	0,000	0,000	211,000
16	0,973	-6,008	505,000	325,000	0,000	0,000	0,000
17	0,967	-2,893	339,000	3,000	0,000	0,000	0,000
18	1,000	1,026	380,000	96,000	2.385,000	594,279	0,000
19	0,978	-0,818	838,000	382,000	0,000	0,000	0,000
20	0,970	-2,720	631,000	430,000	0,000	0,000	235,725
21	0,972	1,161	262,000	43,000	0,000	0,000	0,000
22	0,975	2,561	983,000	642,000	0,000	0,000	0,000
23	0,980	2,892	146,000	21,000	590,000	344,612	0,000
24	0,995	5,486	430,000	205,000	325,000	409,589	0,000
25	0,983	1,089	605,000	197,000	0,000	0,000	229,372
26	1,010	8,806	593,000	144,000	3.025,000	598,163	0,000
<b>Total</b>			<b>12.196,000</b>	<b>4.313,000</b>	<b>12.334,032</b>	<b>4.665,556</b>	<b>676,097</b>

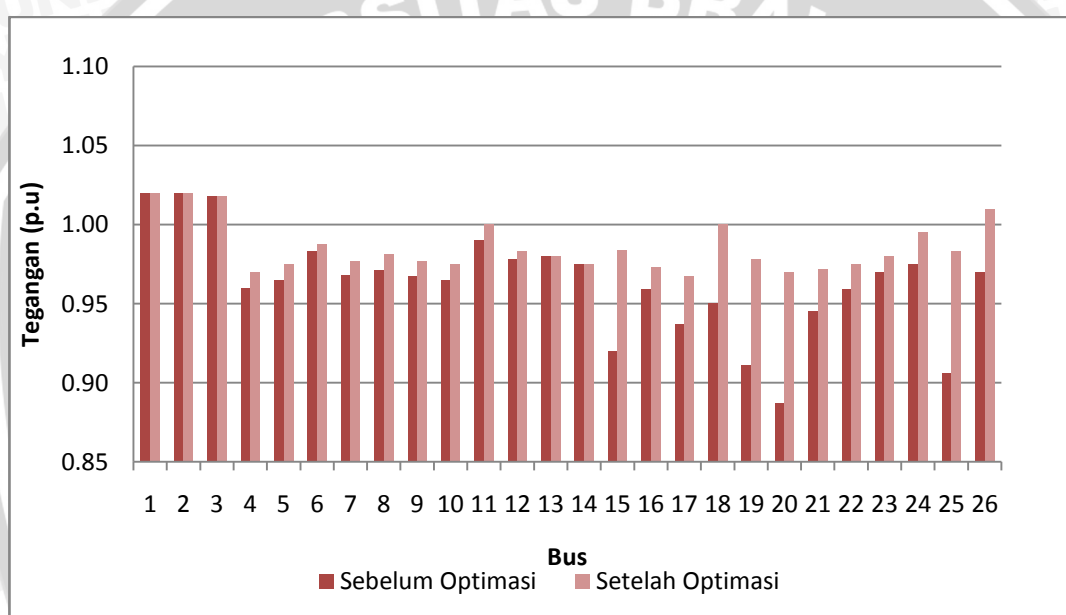
Sumber: Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.12 dapat diketahui bahwa total daya yang dibangkitkan oleh generator adalah sebesar 12.334,032 MW dan 4.665,556 MVAR. Selain itu setelah dilakukan optimasi tegangan pada bus lebih baik dibandingkan dengan sebelum dilakukan optimasi dan berada pada batas standar yang diijinkan. Terutama pada bus-bus yang sebelumnya mempunyai tegangan kritis. Perubahan tegangan pada bus yang sebelumnya berada di luar batas standar ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4. 13. Perubahan Tegangan pada Bus yang Berada di Bawah Batas Standar

No. Bus	Nama Bus	Tegangan (p.u) Sebelum Optimasi	Tegangan (p.u) Setelah Optimasi
15	Tasikmalaya	0,920	0,984
17	Mandikaran	0,937	0,967
19	Ungaran	0,911	0,978
20	Pedan	0,887	0,970
21	Ngimbang	0,945	0,972
25	Kediri	0,906	0,983

Profil tegangan tiap bus sebelum dan setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC disajikan pada satu plot grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4. 2. Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 100%

Dari Gambar 4.2 dapat dilihat bahwa tegangan bus pada sistem setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC lebih stabil dibandingkan dengan tegangan bus pada sistem sebelum dilakukan optimasi.

Sementara untuk rugi-rugi daya yang terjadi pada saluran transmisi ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4. 14. Rugi-rugi Daya pada Saluran Transmisi Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC dengan Pembebanan 100%

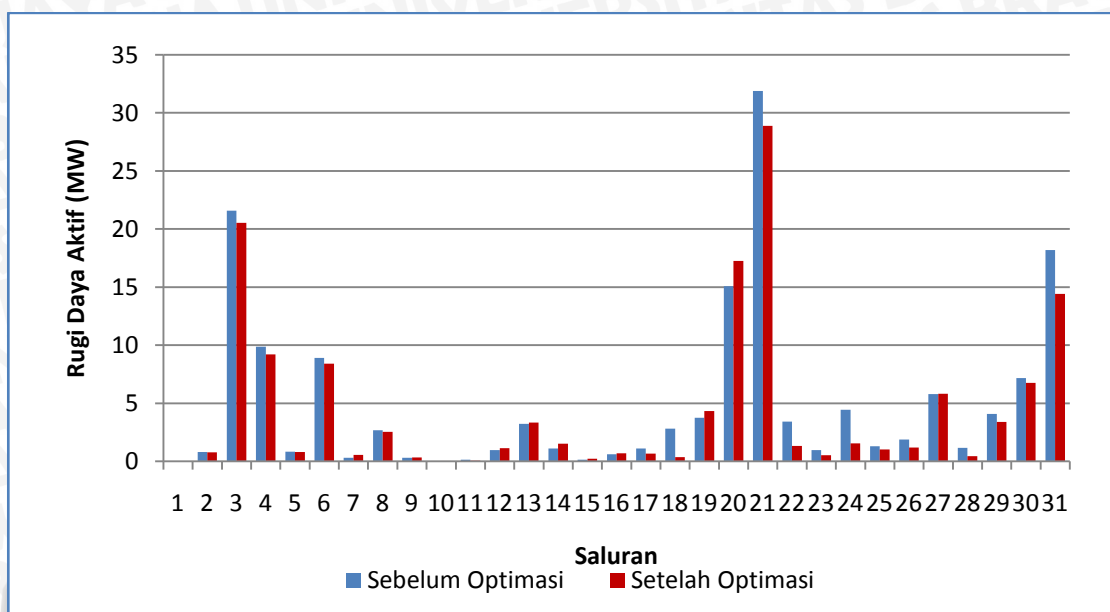
No. Saluran	Dari	Ke	Rugi-rugi Saluran	
			MW	MVAR
1	2	1	0,001	-11,815
2	2	3	0,783	6,384
3	2	6	20,531	196,796
4	3	7	9,212	102,951
5	5	4	0,807	8,131
6	5	6	8,400	80,138
7	7	14	0,543	5,739
8	9	7	2,533	23,973
9	9	8	0,331	2,370
10	10	5	0,018	-4,388
11	10	7	0,048	-1,280
12	11	7	1,137	10,663
13	11	8	3,339	31,786
14	12	11	1,512	13,946
15	12	13	0,220	1,514
16	14	13	0,689	5,544
17	14	16	0,653	0,987
18	15	10	0,366	4,001
19	17	16	4,316	41,241
20	17	19	17,259	38,072
21	19	18	28,885	74,005
22	19	20	1,325	12,555
23	19	21	0,536	5,084
24	20	15	1,543	17,168
25	21	22	1,030	9,629
26	22	19	1,197	11,446
27	22	24	5,828	64,850
28	23	22	0,441	3,098
29	25	20	3,378	37,659
30	26	24	6,762	75,309
31	26	25	14,414	161,110
<b>Total</b>			<b>138,035</b>	<b>1.028,665</b>

Sumber : Hasil Perhitungan

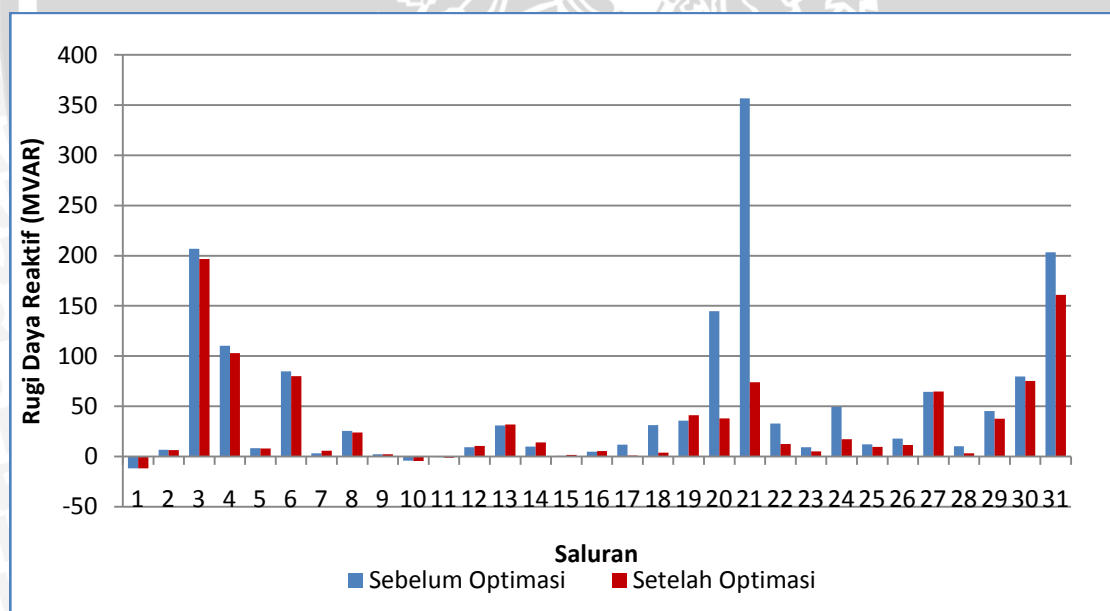
Berdasarkan Tabel 4.14, dapat dilihat hasil aliran daya pada sistem ketika kondisi pembebanan 100% setelah optimasi penempatan SVC dan TCSC. Total rugi daya aktif pada sistem sebesar 138,035 MW sedangkan total rugi daya reaktif pada sistem sebesar 1.028,665 MVAR.



Perbandingan rugi daya aktif dan rugi daya reaktif sebelum dan setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4. 3. Rugi Daya Aktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 100%



Gambar 4. 4. Rugi Daya Reaktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 100%

Dari Gambar 4.3 dan Gambar 4.4 diatas dapat dilihat perbandingan rugi daya aktif dan reaktif tiap saluran. Rugi daya aktif maupun reaktif yang terbesar terjadi pada saluran 21 yang menghubungkan bus 19 dan 18. Setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC dengan metode RGA terjadi penurunan total rugi daya aktif dan reaktif pada sistem.

Untuk rugi daya aktif mengalami penurunan sebesar 10,65% yaitu dari 154,486 MW menjadi 138,035 MW. Sedangkan untuk rugi daya reaktif mengalami penurunan sebesar 35,368% yaitu dari 1.591,582 MVAR menjadi 1.028,665 MVAR.

Dari simulasi juga dapat diketahui lokasi dan kapasitas optimal untuk melakukan kompensasi. Lokasi dan kapasitas optimal untuk penempatan SVC dan TCSC pada sistem Jawa-Bali 500 kV pembebanan 100% ditunjukkan pada Tabel 4.15 dan Tabel 4.16.

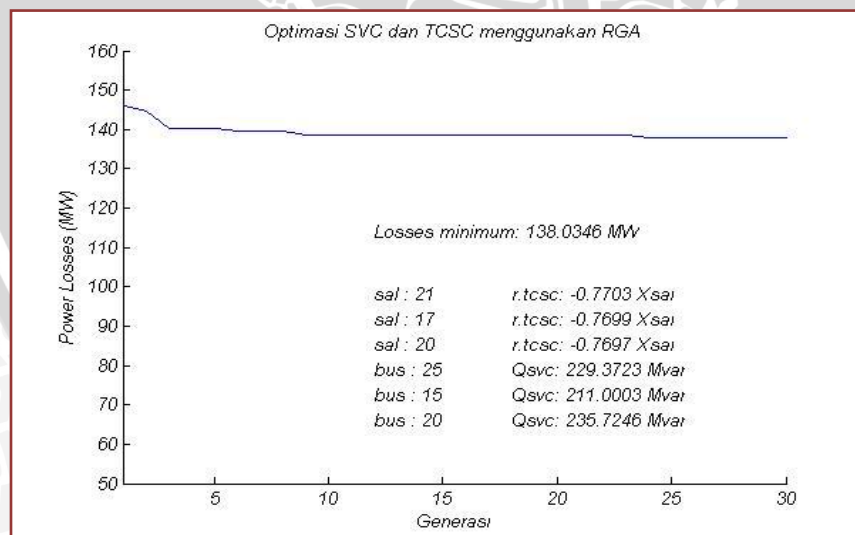
Tabel 4. 15. Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC

Lokasi SVC	Nama Bus	Kapasitas SVC (MVAR)
Bus 15	Tasikmalaya	211,0003
Bus 20	Pedan	135,7246
Bus 25	Kediri	229,3723

Tabel 4. 16. Lokasi dan Rating Optimal TCSC

Lokasi TCSC			Rating TCSC (Xsal)
Saluran	Dari	Ke	
17	14	16	-0,7699
20	17	19	-0,7697
21	19	18	-0,7703

Grafik perubahan rugi daya aktif dari setiap generasi pada simulasi optimasi penempatan SVC dan TCSC menggunakan metode RGA ditunjukkan pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5. Grafik Konvergensi RGA untuk Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 100%

Dari grafik diatas dapat diketahui lokasi serta kapasitas SVC dan TCSC yang optimal untuk melakukan kompensasi sehingga didapatkan rugi daya aktif minimum. Besar rugi daya

minimum didapat pada generasi ke-24 atau bisa dikatakan simulasi mencapai titik konvergensi pada generasi ke-24 dengan nilai 138,0346 MW.

#### 4.3.2. Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV dengan Pembebanan 80%

Simulasi untuk optimasi penempatan SVC dan TCSC selanjutnya dilakukan pada sistem dengan pembebanan 80% atau beban rata-rata. Hasil dari simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.17.

Tabel 4. 17. Hasil Simulasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Jawa-Bali 500 kV dengan Pembebanan 80%

No. Bus	Tegangan (p.u)		Beban		Pembangkitan		Injeksi
	Magnitude	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1,020	-0,005	68,800	27,200	0,000	0,000	0,000
2	1,020	0,000	113,600	-44,800	2.893,346	710,006	0,000
3	1,019	-0,345	256,000	-111,200	0,000	0,000	0,000
4	0,978	-6,123	540,800	170,400	0,000	0,000	0,000
5	0,982	-5,593	577,600	37,600	0,000	0,000	0,000
6	0,994	-3,483	508,800	202,400	0,000	0,000	0,000
7	0,982	-5,626	378,400	280,000	0,000	0,000	0,000
8	0,985	-6,869	274,400	77,600	0,000	0,000	0,000
9	0,982	-7,166	877,600	63,200	0,000	0,000	0,000
10	0,982	-5,624	428,800	132,800	0,000	0,000	0,000
11	1,000	-5,202	0,000	0,000	1.080,800	1.061,843	0,000
12	0,984	-5,704	532,800	370,400	0,000	0,000	0,000
13	0,980	-5,429	520,000	216,000	292,000	435,086	0,000
14	0,975	-5,066	0,000	0,000	517,600	-245,582	0,000
15	0,995	-3,204	109,600	38,400	0,000	0,000	234,905
16	0,968	-4,953	404,000	260,000	0,000	0,000	0,000
17	0,969	-3,038	271,200	2,400	0,000	0,000	0,000
18	1,000	4,493	304,000	76,800	1.908,000	519,187	0,000
19	0,981	2,876	670,400	305,600	0,000	0,000	0,000
20	0,981	0,713	504,800	344,000	0,000	0,000	243,120
21	0,975	4,292	209,600	34,400	0,000	0,000	0,000
22	0,977	5,365	786,400	513,600	0,000	0,000	0,000
23	0,980	5,635	116,800	16,800	472,000	208,166	0,000
24	0,995	7,623	344,000	164,000	260,000	297,713	0,000
25	0,994	3,878	484,000	157,600	0,000	0,000	235,514
26	1,010	10,191	474,400	115,200	2.420,000	478,228	0,000
<b>Total</b>			<b>9.756,800</b>	<b>3.450,400</b>	<b>9.843,746</b>	<b>3.464,647</b>	<b>713,539</b>

Sumber: Hasil Perhitungan

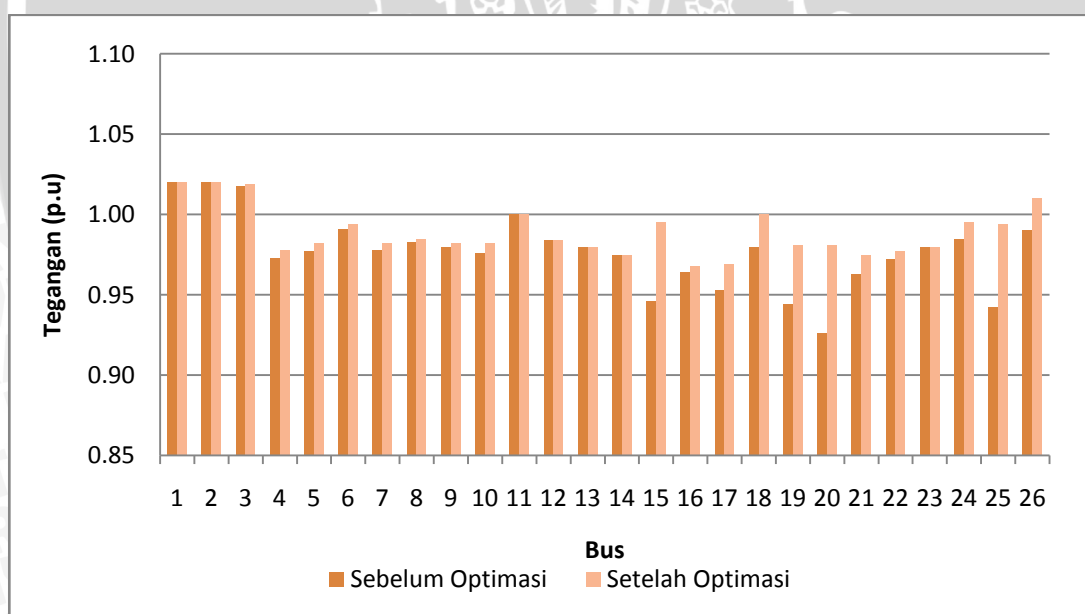


Dari Tabel 4.17 dapat diketahui bahwa total daya yang dibangkitkan oleh generator adalah sebesar 9.843,746 MW dan 3.464,647MVAR. Selain itu setelah dilakukan optimasi tegangan pada bus lebih stabil dibandingkan dengan sebelum dilakukan optimasi dan berada pada batas standar yang diijinkan. Terutama pada bus-bus yang sebelumnya mempunyai tegangan kritis. Perubahan tegangan pada bus yang sebelumnya berada di luar batas standar ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Tabel 4. 18. Perubahan Tegangan pada Bus yang Berada di Luar Batas Standar

No. Bus	Nama Bus	Tegangan (p.u) Sebelum Optimasi	Tegangan (p.u) Setelah Optimasi
15	Tasikmalaya	0,946	0,995
19	Ungaran	0,944	0,981
20	Pedan	0,926	0,981
25	Kediri	0,942	0,994

Profil tegangan tiap bus sebelum dan setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC disajikan pada satu plot grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6. Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 80%

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa tegangan bus pada sistem setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC lebih stabil dibandingkan dengan tegangan bus pada sistem sebelum dilakukan optimasi.

Dari hasil simulasi juga didapatkan rugi-rugi daya yang terjadi pada saluran transmisi sistem yang ditunjukkan pada Tabel 4.19.

Tabel 4. 19. Rugi-rugi Daya pada Saluran Transmisi Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC dengan Pembebanan 80%

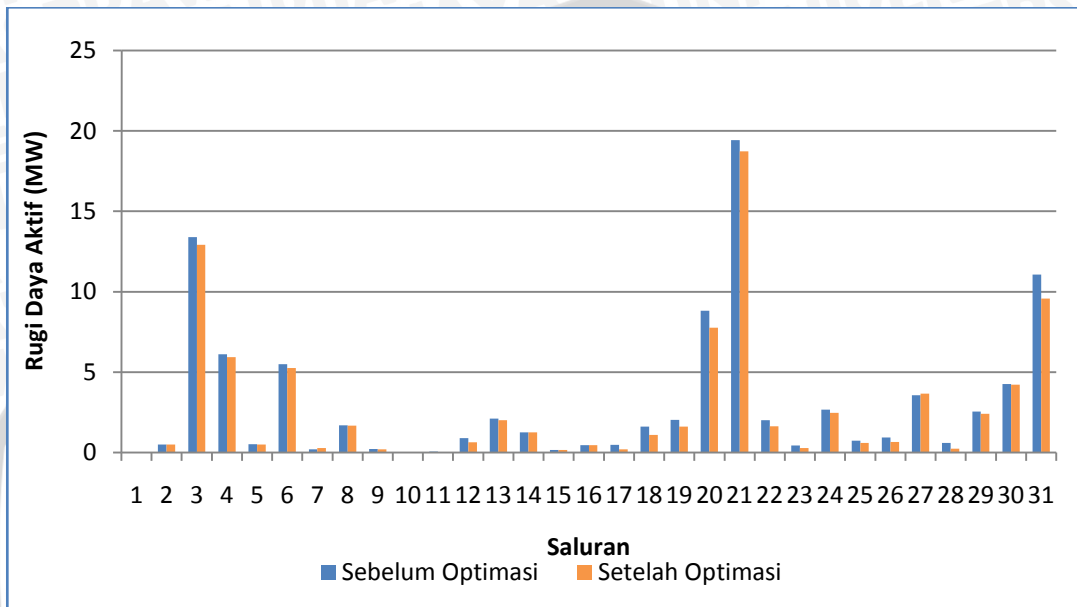
No. Saluran	Dari	Ke	Rugi Saluran	
			MW	MVAR
1	2	1	0,001	-11,820
2	2	3	0,500	3,218
3	2	6	12,924	123,710
4	3	7	5,932	66,251
5	5	4	0,508	4,777
6	5	6	5,257	49,947
7	7	14	0,274	2,735
8	9	7	1,680	15,779
9	9	8	0,192	1,025
10	10	5	0,010	-4,531
11	10	7	0,001	-1,747
12	11	7	0,644	5,926
13	11	8	2,017	19,091
14	12	11	1,254	11,465
15	12	13	0,152	0,864
16	14	13	0,460	3,344
17	14	16	0,199	1,512
18	15	10	1,087	12,059
19	17	16	1,609	15,237
20	17	19	7,768	76,393
21	19	18	18,735	52,734
22	19	20	1,627	15,450
23	19	21	0,284	2,661
24	20	15	2,466	27,497
25	21	22	0,607	5,563
26	22	19	0,657	6,260
27	22	24	3,654	40,524
28	23	22	0,238	1,146
29	25	20	2,414	26,866
30	26	24	4,218	46,845
31	26	25	9,578	107,007
<b>Total</b>			<b>86,946</b>	<b>727,786</b>

Sumber: Hasil Perhitungan

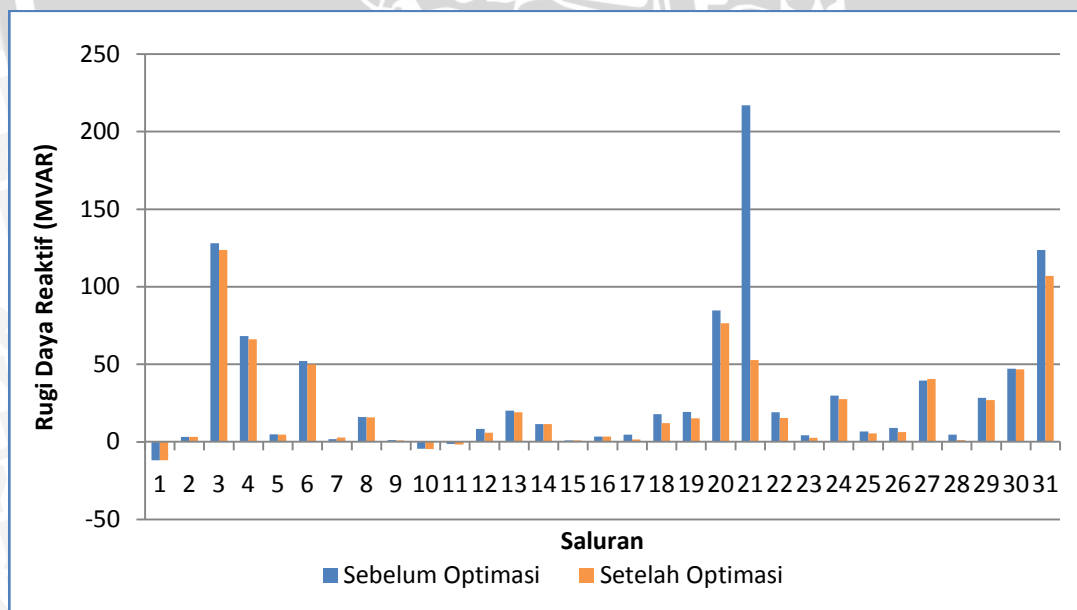
Berdasarkan Tabel 4.19, dapat dilihat hasil aliran daya pada sistem ketika kondisi pembebanan 80% setelah optimasi penempatan SVC dan TCSC. Total rugi daya aktif pada

sistem sebesar 86,946 MW sedangkan total rugi daya reaktif pada sistem sebesar 727,786 MVAR.

Perbandingan rugi daya aktif dan rugi daya reaktif sebelum dan setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4. 7. Rugi Daya Aktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 80%



Gambar 4. 8. Rugi Daya Reaktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 80%



Dari Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 diatas dapat dilihat perbandingan rugi daya aktif dan reaktif tiap saluran. Rugi daya aktif yang terbesar terjadi pada saluran 21 yang menghubungkan bus 19 dan 18, sedangkan rugi daya reaktif yang terbesar setelah dilakukan optimasi terjadi pada saluran 3 yang menghubungkan bus 2 dan bus 6.

Setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC dengan metode RGA terjadi penurunan total rugi daya aktif dan reaktif pada sistem. Untuk rugi daya aktif mengalami penurunan sebesar 7,78% yaitu dari 94,284 MW menjadi 86,964 MW. Sedangkan untuk rugi daya reaktif mengalami penurunan sebesar 24,08% yaitu dari 958,645 MVAR menjadi 727,786 MVAR.

Dari simulasi didapatkan lokasi yang optimal untuk menempatkan SVC dan TCSC sekaligus kapasitas SVC dan rating TCSC yang digunakan agar rugi daya yang dihasilkan oleh sistem seminimal mungkin. Lokasi dan kapasitas optimal untuk penempatan SVC dan TCSC pada sistem Jawa-Bali 500 kV pembebanan 80% ditunjukkan pada Tabel 4.20 dan Tabel 4.21.

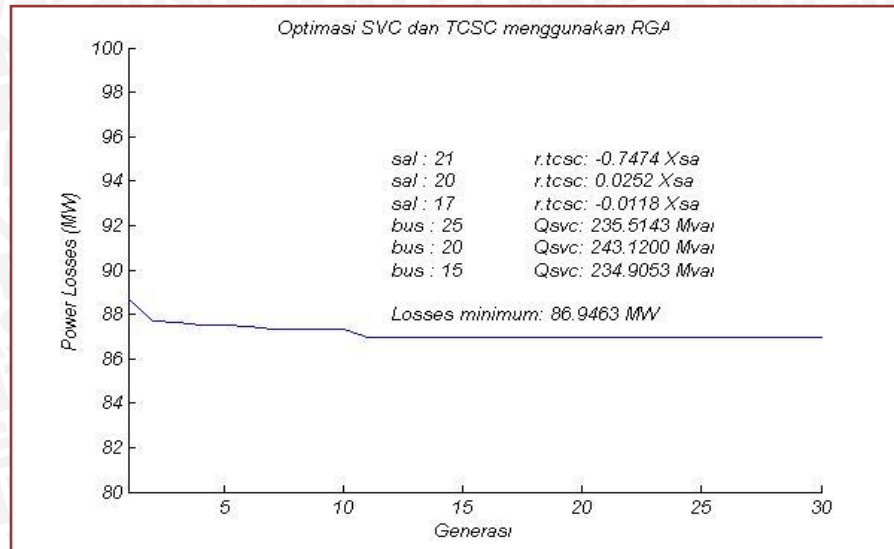
Tabel 4. 20. Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC

Lokasi SVC	Nama Bus	Kapasitas SVC (MVAR)
Bus 15	Tasikmalaya	234,9053
Bus 20	Pedan	243,1200
Bus 25	Kediri	235,5143

Tabel 4. 21. Lokasi dan Rating Optimal TCSC

Saluran	Lokasi TCSC			Rating TCSC (Xsal)
	Dari		Ke	
17	14		16	-0,0118
20	17		19	0,0252
21	19		18	-0,7474

Grafik perubahan rugi daya aktif dari setiap generasi pada simulasi optimasi penempatan SVC dan rating TCSC pada sistem dengan pembebanan 80% menggunakan metode RGA ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4. 9. Grafik Konvergensi RGA untuk Penempatan SVC dan TCSC pada Pembebanan 80%

Dari grafik diatas dapat diketahui lokasi serta kapasitas SVC dan TCSC yang optimal untuk melakukan kompensasi sehingga didapatkan rugi daya aktif minimum. Besar rugi daya aktif minimum didapat pada generasi ke-11 dengan nilai 86,9463 MW.

#### 4.4. Simulasi Sistem Standar IEEE 30 Bus

Pada penelitian data sistem standar IEEE 30 bus digunakan sebagai data validasi yaitu sebagai data untuk menguji program simulasi sebelum diaplikasikan pada data real sistem Jawa-Bali 500 kV. Sumber data sistem standar IEEE 30 bus diambil dari tugas akhir Gugun Supriatna Dwi Jatnika yang berjudul “Optimasi Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa-Bali dengan Aliran Daya Optimal MINOPF” pada tahun 2013.

##### 4.4.1. Data Sistem Standar IEEE 30 Bus

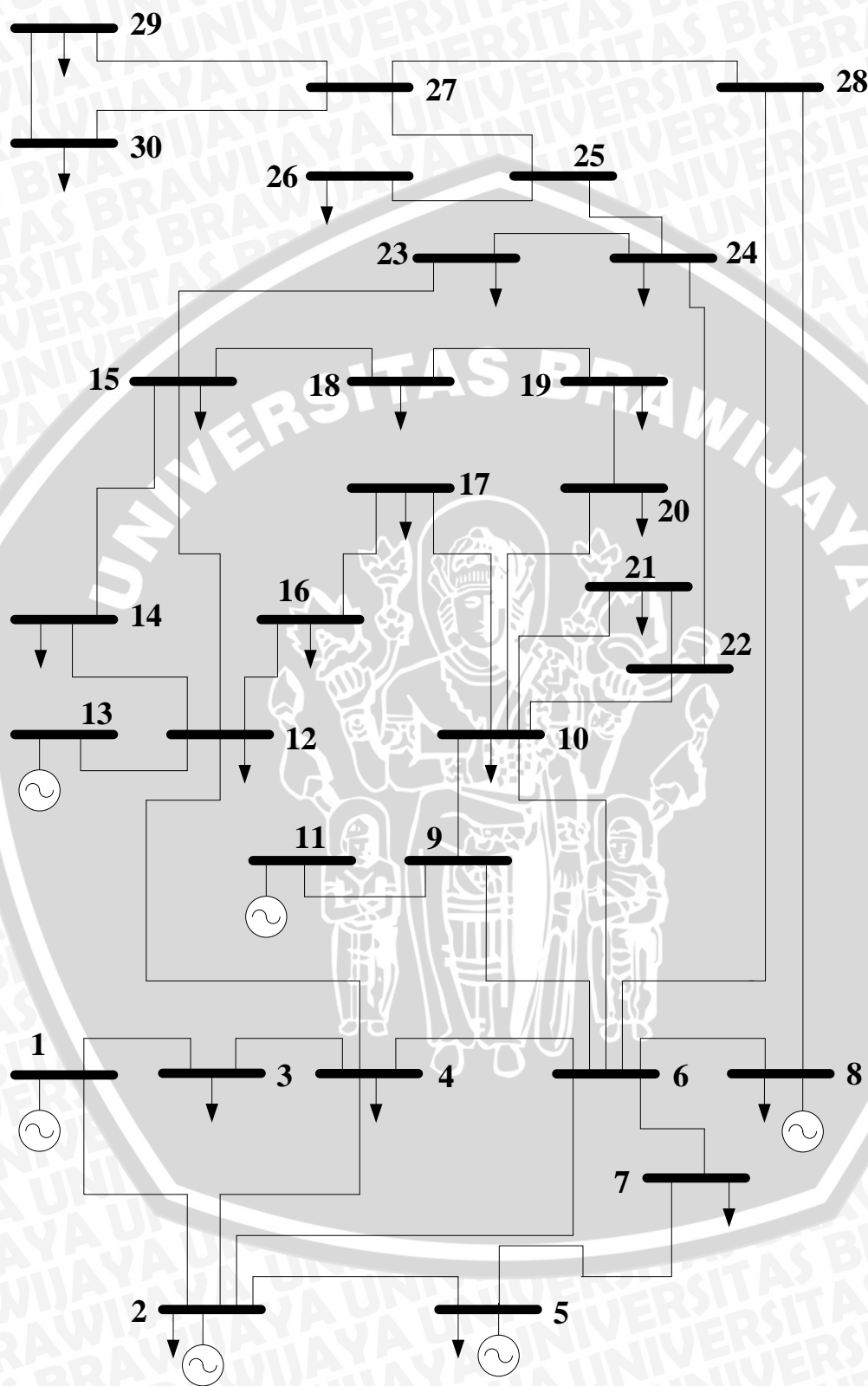
Data sistem standar IEEE yang digunakan terdiri dari 30 bus, 41 saluran, dan 6 pembangkit. Bus-bus pada sistem tersebut diklasifikasikan menurut jenisnya seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.22.

Tabel 4. 22. Jenis Bus pada Sistem Standar IEEE 30 Bus

Jenis Bus	Nomor Bus	Jumlah Bus
Slack Bus	1	1
Bus Beban	3, 4, 6, 7, 9, 10, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30	24
Bus Generator	2, 5, 8, 11, 13	5
Jumlah		30

Sumber: Supriatna (2013:32)

Single line diagram sistem standar IEEE 30 bus ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4. 10. Single Line Diagram Sistem Standar IEEE 30 Bus  
Sumber: IEEE





Sementara untuk data saluran transmisi sistem standar IEEE 30 bus ditunjukkan pada Tabel 4.23.

Tabel 4. 23. Data Saluran Transmisi Sistem Standar IEEE 30 Bus

No. Saluran	Dari	Ke	R (p.u)	X (p.u)	1/2B (p.u)	Tap Setting
1	1	2	0.020	0.060	0.030	1.000
2	1	3	0.050	0.200	0.020	1.000
3	2	4	0.060	0.180	0.020	1.000
4	3	4	0.010	0.040	0.000	1.000
5	2	5	0.050	0.200	0.000	1.000
6	2	6	0.060	0.180	0.020	1.000
7	4	6	0.010	0.040	0.000	1.000
8	5	7	0.050	0.120	0.010	1.000
9	6	7	0.030	0.080	0.000	1.000
10	6	8	0.010	0.040	0.000	1.000
11	6	9	0.000	0.210	0.000	1.000
12	6	10	0.000	0.560	0.000	1.000
13	9	11	0.000	0.210	0.000	1.000
14	9	10	0.000	0.110	0.000	1.000
15	4	12	0.000	0.230	0.000	1.000
16	12	13	0.000	0.140	0.000	1.000
17	12	14	0.120	0.260	0.000	1.000
18	12	15	0.070	0.130	0.000	1.000
19	12	16	0.090	0.200	0.000	1.000
20	14	15	0.220	0.200	0.000	1.000
21	16	17	0.080	0.190	0.000	1.000
22	15	18	0.110	0.220	0.000	1.000
23	18	19	0.060	0.130	0.000	1.000
24	19	20	0.030	0.070	0.000	1.000
25	10	20	0.090	0.210	0.000	1.000
26	10	17	0.030	0.090	0.000	1.000
27	10	21	0.030	0.080	0.000	1.000
28	10	22	0.070	0.150	0.000	1.000
29	21	22	0.010	0.220	0.000	1.000
30	15	23	0.100	0.220	0.000	1.000
31	22	24	0.110	0.180	0.000	1.000
32	23	24	0.130	0.270	0.000	1.000
33	24	25	0.190	0.330	0.000	1.000
34	25	26	0.250	0.380	0.000	1.000
35	25	27	0.110	0.210	0.000	1.000
36	28	27	0.000	0.400	0.000	1.000
37	27	29	0.220	0.400	0.000	1.000
38	27	30	0.320	0.600	0.000	1.000
39	29	30	0.240	0.450	0.000	1.000
40	8	28	0.060	0.200	0.020	1.000
41	6	28	0.070	0.060	0.010	1.000

Sumber: IEEE

Data pembebanan sistem standar IEEE 30 bus ditunjukkan pada Tabel 4.24.

Tabel 4. 24. Data Pembebanan Sistem Standar IEEE 30 bus

No Bus	Kode Bus	Tegangan		Beban	
		Magnitude	Degree	P (MW)	Q (MVAR)
1	1	1,000	0,000	0,000	0,000
2	2	1,000	0,000	21,700	12,700
3	0	1,000	0,000	2,400	1,200
4	0	1,000	0,000	7,600	1,600
5	2	1,000	0,000	0,000	0,000
6	0	1,000	0,000	0,000	0,000
7	0	1,000	0,000	22,800	10,900
8	2	1,000	0,000	30,000	30,000
9	0	1,000	0,000	0,000	0,000
10	0	1,000	0,000	5,919	2,000
11	2	1,000	0,000	0,000	0,000
12	0	1,000	0,000	11,200	7,500
13	2	1,000	0,000	0,000	0,000
14	0	1,000	0,000	6,200	1,600
15	0	1,000	0,000	8,200	2,500
16	0	1,000	0,000	3,500	1,800
17	0	1,000	0,000	9,000	5,800
18	0	1,000	0,000	3,200	0,900
19	0	1,000	0,000	9,500	3,400
20	0	1,000	0,000	2,200	0,700
21	0	1,000	0,000	19,669	11,200
22	0	1,000	0,000	0,000	0,000
23	0	1,000	0,000	3,200	1,600
24	0	1,000	0,000	15,000	6,700
25	0	1,000	0,000	1,000	0,000
26	0	1,000	0,000	3,500	2,300
27	0	1,000	0,000	0,000	0,000
28	0	1,000	0,000	0,000	0,000
29	0	1,000	0,000	3,659	0,900
30	0	1,000	0,000	12,000	1,900

Sumber: IEEE

Kode bus pada Tabel 4.24 merepresentasikan jenis bus pada sistem. Pada kolom kode bus angka 1 merupakan kode untuk *slack* bus, 2 untuk bus generator atau bus pembangkit, dan 3 untuk bus beban.

Besar daya aktif dan reaktif yang dibangkitkan oleh setiap pembangkit pada sistem standar IEEE 30 bus dipaparkan pada Tabel 4.25.



Tabel 4. 25. Data Pembangkitan Sistem Standar IEEE 30 bus

No. Bus	P <sub>G</sub> (MW)	Q <sub>G</sub> (MVAR)	Q <sub>G</sub> min (MVAR)	Q <sub>G</sub> max (MVAR)
1	138,480	-2,790	-20,000	150,000
2	40,000	50,000	-20,000	60,000
5	0,000	37,000	-15,000	62,500
8	0,000	37,300	-15,000	48,700
11	0,000	16,200	-10,000	40,000
13	0,000	10,600	-15,000	44,700

Sumber: IEEE

#### 4.4.2. Aliran Daya Sistem Standar IEEE 30 Bus Sebelum Optimasi

Pada penelitian ini digunakan metode Newton-Raphson untuk menyelesaikan permasalahan aliran daya. Fungsi dari aliran daya adalah untuk mengetahui nilai tegangan masing-masing bus dan besar rugi daya pada saluran transmisi.

Penyelesaian aliran daya menggunakan metode Newton-Raphson didasarkan pada:

1. Tegangan dasar = 100 kV
2. Daya dasar = 200 MVA
3. Akurasi = 0,0001
4. Maksimum iterasi = 500

Setelah dilakukan aliran daya (*load flow*) pada sistem Standar IEEE 30 bus menggunakan metode Newton-Raphson, diperoleh hasil aliran daya sebelum dilakukan optimasi ditunjukkan pada tabel 4.26.

Tabel 4. 26. Hasil Aliran Daya Sistem Standar IEEE 30 Bus Sebelum Optimasi

No. Bus	Tegangan		Beban		Pembangkitan		Injeksi
	Magnitude	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1,000	0,000	0,000	0,000	167,219	-42,788	0,000
2	1,000	-1,867	21,700	12,700	40,000	36,699	0,000
3	0,988	-3,116	2,400	1,200	0,000	0,000	0,000
4	0,984	-3,805	7,600	1,600	0,000	0,000	0,000
5	1,000	-3,570	0,000	0,000	0,000	15,826	0,000
6	0,981	-4,397	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,985	-4,325	22,800	10,900	0,000	0,000	0,000
8	0,980	-4,788	30,000	30,000	0,000	28,971	0,000
9	0,974	-6,357	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,958	-7,419	5,900	2,000	0,000	0,000	0,000
11	1,000	-6,357	0,000	0,000	0,000	24,560	0,000
12	0,975	-7,293	11,200	7,500	0,000	0,000	0,000



No. Bus	Tegangan		Beban		Pembangkitan		Injeksi
	Magnitude	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
13	1,000	-7,293	0,000	0,000	0,000	35,619	0,000
14	0,962	-7,766	6,200	1,600	0,000	0,000	0,000
15	0,956	-7,660	8,200	2,500	0,000	0,000	0,000
16	0,964	-7,477	3,500	1,800	0,000	0,000	0,000
17	0,957	-7,573	9,000	5,800	0,000	0,000	0,000
18	0,934	-7,543	3,200	0,900	0,000	0,000	0,000
19	0,922	-7,350	9,500	34,000	0,000	0,000	0,000
20	0,931	-7,417	2,200	0,700	0,000	0,000	0,000
21	0,951	-7,763	19,669	11,200	0,000	0,000	0,000
22	0,951	-7,764	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,949	-7,964	3,200	1,600	0,000	0,000	0,000
24	0,943	-8,167	15,000	6,700	0,000	0,000	0,000
25	0,951	-7,984	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
26	0,941	-8,222	3,500	2,300	0,000	0,000	0,000
27	0,961	-7,646	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
28	0,978	-4,795	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
29	0,948	-8,532	3,659	0,900	0,000	0,000	0,000
30	0,942	-9,056	12,000	1,900	0,000	0,000	0,000
<b>Total</b>			<b>201,428</b>	<b>137,800</b>	<b>207,219</b>	<b>98,887</b>	<b>0,000</b>

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari Tabel 4.26 hasil *load flow* sistem standar IEEE 30 bus sebelum optimasi diperoleh nilai tegangan setiap bus. Jika mengacu pada standar SPLN dimana batas nilai tegangan yaitu  $1 \pm 5\%$  p.u atau  $0.95 \leq V_{bus} \leq 1.05$ , maka ada 8 bus yang mempunyai nilai tegangan di luar batas standar. Bus-bus dengan tegangan di luar batas standar tersebut ditunjukkan pada Tabel 4.27.

Tabel 4.27.

Tabel 4. 27. Bus-bus dengan Tegangan yang Tidak Memenuhi Standar

No. Bus	Tegangan (p.u)	Kondisi
18	0,934	<i>Undervoltage</i>
19	0,922	<i>Undervoltage</i>
20	0,931	<i>Undervoltage</i>
23	0,949	<i>Undervoltage</i>
24	0,943	<i>Undervoltage</i>
26	0,941	<i>Undervoltage</i>
29	0,948	<i>Undervoltage</i>
30	0,942	<i>Undervoltage</i>

Sedangkan untuk rugi-rugi daya pada saluran ditunjukkan pada Tabel 4.28.

Tabel 4. 28. Rugi-rugi Daya Saluran Transmisi Sistem Standar IEEE 30 Bus Sebelum Optimasi

No. Saluran	Dari	Ke	Rugi Daya	
			MW	MVAR
1	1	2	1,109	-7,237
2	1	3	0,947	-4,601
3	2	4	0,473	-5,801
4	2	5	0,201	-7,517
5	2	6	0,763	-5,028
6	3	4	0,255	-0,901
7	4	6	0,140	-1,250
8	4	12	0,000	2,836
9	5	7	0,235	-3,427
10	6	7	0,011	-3,254
11	6	8	0,059	-1,526
12	6	9	0,000	1,122
13	6	10	0,000	1,140
14	6	28	0,048	-2,328
15	8	28	0,001	-8,206
16	9	11	0,000	0,627
17	9	10	0,000	1,089
18	10	20	0,261	0,583
19	10	17	0,006	0,015
20	10	21	0,086	0,185
21	10	22	0,042	0,087
22	12	13	0,000	0,888
23	12	14	0,068	0,141
24	12	15	0,253	0,497
25	12	16	0,054	0,114
26	14	15	0,023	0,021
27	15	18	0,178	0,362
28	15	23	0,031	0,062
29	16	17	0,013	0,048
30	18	19	0,085	0,172
31	19	20	0,083	0,165
32	21	22	0,000	0,001
33	22	24	0,051	0,079
34	23	24	0,011	0,023
35	24	25	0,017	0,029
36	25	26	0,025	0,038
37	25	27	0,050	0,095
38	27	29	0,073	0,137
39	27	30	0,122	0,230
40	28	27	0,000	1,337
41	29	30	0,021	0,039
<b>Total</b>			<b>5,791</b>	<b>-38,913</b>

Sumber: Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.28 dapat dilihat aliran daya serta rugi-rugi daya pada saluran sistem transmisi sistem standar IEEE 30 bus sebelum optimasi. Rugi daya aktif sistem sebesar 5,791 MW dan rugi daya reaktif sistem sebesar -38,913 MVAR.

#### 4.4.3. Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Standar IEEE 30 Bus

Hasil simulasi untuk optimasi penempatan SVC dan TCSC pada sistem standar IEEE 30 bus menggunakan metode RGA ditunjukkan pada Tabel 4.29.

Tabel 4. 29. Hasil Simulasi Optimasi Penempatan SVC dan TCSC pada Sistem Standar IEEE 30 Bus

No. Bus	Tegangan		Beban		Pembangkitan		Injeksi
	Magnitude	Degree	MW	MVAR	MW	MVAR	MVAR
1	1,000	0,000	0,000	0,000	166,417	-49,908	0,000
2	1,000	-1,851	21,700	12,700	40,000	16,596	0,000
3	0,994	-3,196	2,400	1,200	0,000	0,000	0,000
4	0,991	-3,904	7,600	1,600	0,000	0,000	0,000
5	1,000	-3,528	0,000	0,000	0,000	5,643	0,000
6	0,991	-4,536	0,000	0,000	0,000	0,000	18,933
7	0,991	-4,398	22,800	10,900	0,000	0,000	0,000
8	0,990	-4,915	30,000	30,000	0,000	27,503	0,000
9	0,994	-6,469	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,982	-7,501	5,900	2,000	0,000	0,000	0,000
11	1,030	-6,469	0,000	0,000	0,000	-12,071	37,784
12	0,987	-7,258	11,200	7,500	0,000	0,000	0,000
13	1,000	-7,258	0,000	0,000	0,000	18,101	0,000
14	0,981	-7,454	6,200	1,600	0,000	0,000	0,000
15	0,977	-7,741	8,200	2,500	0,000	0,000	0,000
16	0,980	-7,562	3,500	1,800	0,000	0,000	0,000
17	0,979	-7,604	9,000	5,800	0,000	0,000	0,000
18	0,973	-8,096	3,200	0,900	0,000	0,000	0,000
19	0,972	-8,131	9,500	34,000	0,000	0,000	32,438
20	0,974	-8,006	2,200	0,700	0,000	0,000	0,000
21	0,974	-7,828	19,669	11,200	0,000	0,000	0,000
22	0,974	-7,828	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
23	0,970	-8,018	3,200	1,600	0,000	0,000	0,000
24	0,965	-8,195	15,000	6,700	0,000	0,000	0,000
25	0,968	-7,975	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
26	0,959	-8,204	3,500	2,300	0,000	0,000	0,000
27	0,975	-7,626	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
28	0,989	-4,925	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
29	0,964	-8,485	3,659	0,900	0,000	0,000	0,000
30	0,957	-8,992	12,000	1,900	0,000	0,000	0,000
Total			201,428	137,800	206,417	5,864	89,155

Sumber: Hasil Perhitungan

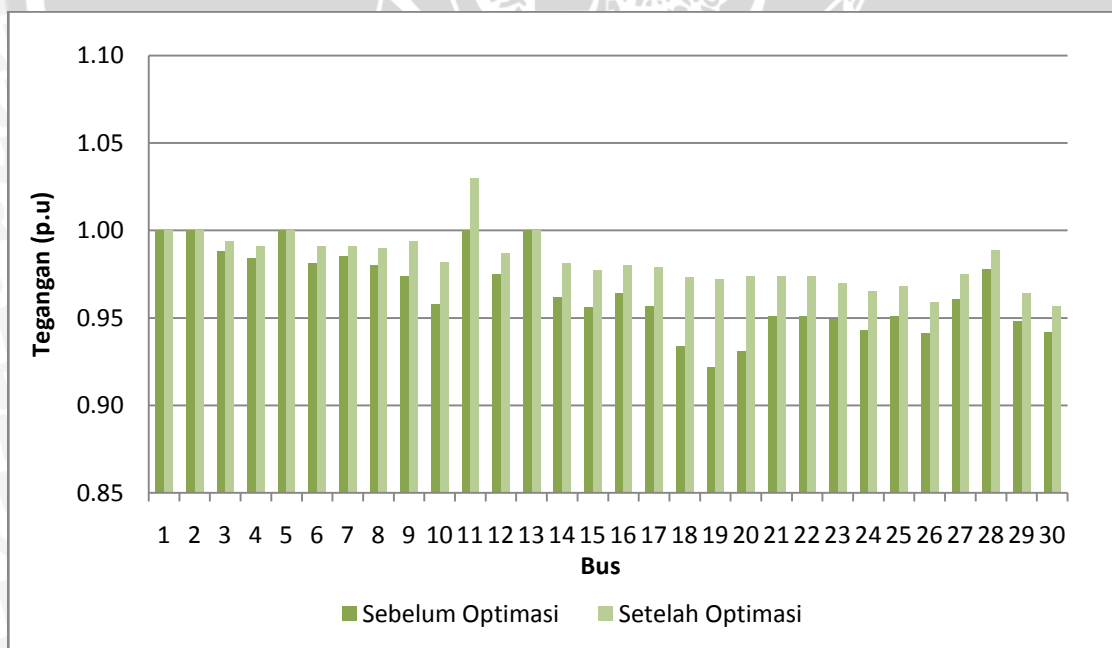


Dari Tabel 4.29 dapat diketahui bahwa total daya yang dibangkitkan oleh generator adalah sebesar 206,417 MW dan 5,864 MVAR. Selain itu setelah dilakukan optimasi tegangan pada bus lebih stabil dibandingkan dengan sebelum dilakukan optimasi dan berada pada batas standart yang diijinkan. Terutama pada bus-bus yang sebelumnya mempunyai tegangan kritis. Perubahan tegangan pada bus yang sebelumnya berada di luar batas standart ditunjukkan pada Tabel 4.30.

Tabel 4. 30. Perubahan Tegangan pada Bus yang Berada di Luar Batas Standart

No. Bus	Tegangan (p.u)	
	Sebelum Optimasi	Setelah Optimasi
18	0,934	0,973
19	0,922	0,972
20	0,931	0,974
23	0,949	0,970
24	0,943	0,965
26	0,941	0,959
29	0,948	0,964
30	0,942	0,957

Profil tegangan tiap bus sebelum dan setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC disajikan pada satu plot grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.11.



Gambar 4. 11. Profil Tegangan Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC

Dari Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa tegangan bus pada sistem setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC lebih stabil dibandingkan dengan tegangan bus pada sistem sebelum dilakukan optimasi.

Sementara untuk rugi-rugi daya yang terjadi pada saluran transmisi ditunjukkan pada Tabel 4.31.

Tabel 4. 31. Rugi-rugi Daya pada Saluran Transmisi Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC

No. Saluran	Dari	Ke	Rugi Daya	
			Aktif (MW)	Reaktif (MVAR)
1	1	2	1,091	-7,293
2	1	3	0,964	-4,586
3	2	4	0,459	-5,898
4	2	5	0,195	-7,543
5	2	6	0,759	-5,115
6	3	4	0,257	-0,919
7	4	6	0,153	-1,236
8	4	12	0,000	2,632
9	5	7	0,184	-3,580
10	6	7	0,004	-3,327
11	6	8	0,057	-1,568
12	6	9	0,000	1,083
13	6	10	0,000	0,973
14	6	28	0,044	-2,394
15	8	28	0,000	-8,382
16	9	11	0,000	1,262
17	9	10	0,000	0,846
18	10	20	0,046	0,102
19	10	17	0,008	0,021
20	10	21	0,089	0,192
21	10	22	0,045	0,093
22	12	13	0,000	0,230
23	12	14	0,067	0,041
24	12	15	0,111	0,219
25	12	16	0,029	0,062
26	14	15	0,019	0,017
27	15	18	0,018	0,037
28	15	23	0,028	0,057
29	16	17	0,004	0,005
30	18	19	0,002	0,001
31	19	20	0,010	0,019
32	21	22	0,000	0,000
33	22	24	0,064	0,100
34	23	24	0,010	0,020
35	24	25	0,007	0,012

No. Saluran	Dari	Ke	Rugi Daya	
			Aktif (MW)	Reaktif (MVAR)
36	25	26	0,024	0,036
37	25	27	0,034	0,065
38	27	29	0,070	0,133
39	27	30	0,118	0,222
40	28	27	0,000	1,177
41	29	30	0,020	0,038
<b>Total</b>			<b>4,992</b>	<b>-42,142</b>

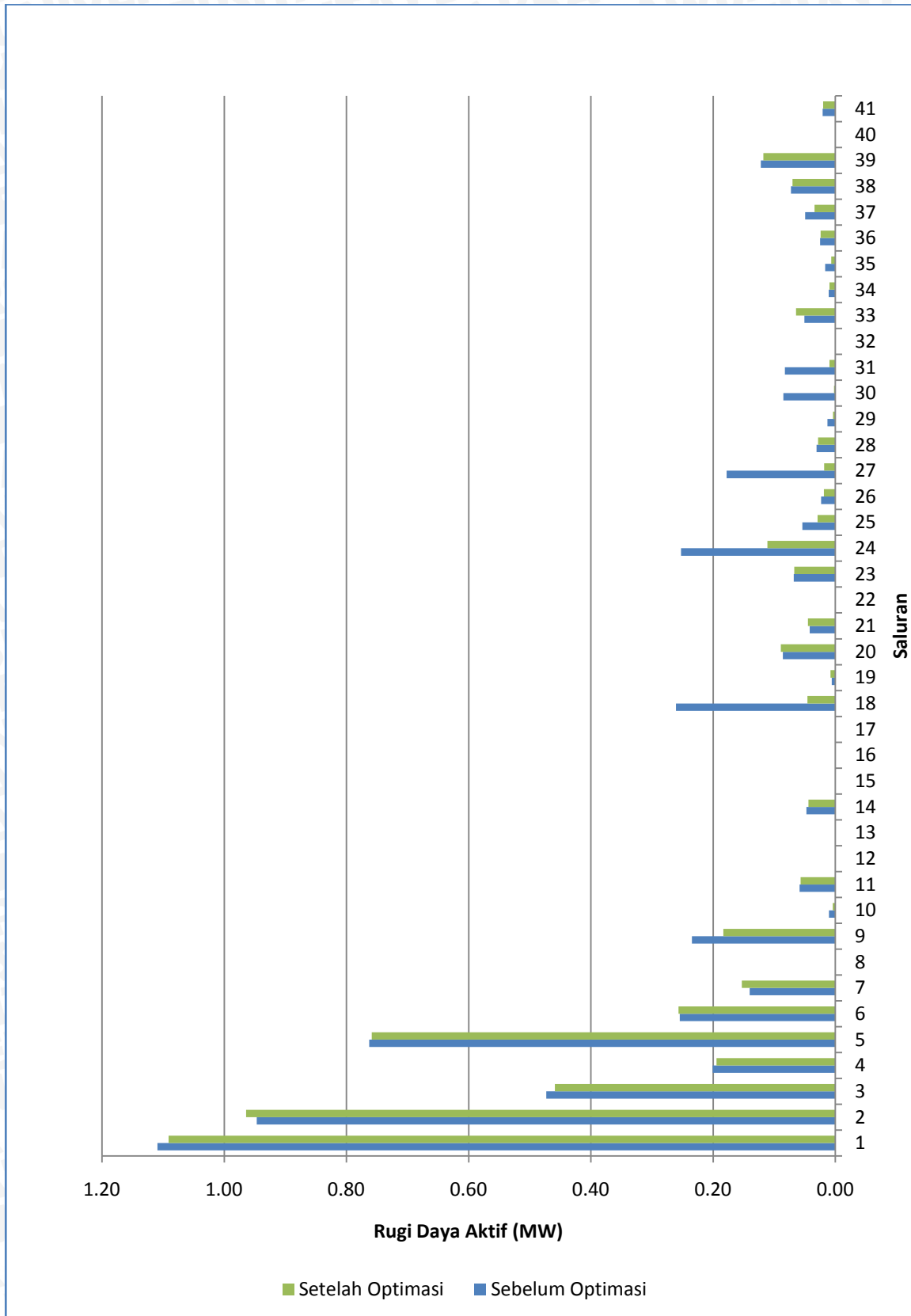
Sumber : Hasil Perhitungan

Berdasarkan Tabel 4.31, dapat dilihat hasil aliran daya pada sistem setelah optimasi penempatan SVC dan TCSC. Total rugi daya aktif pada sistem sebesar 4,992 MW sedangkan total rugi daya reaktif pada sistem sebesar -42,142 MVAR.

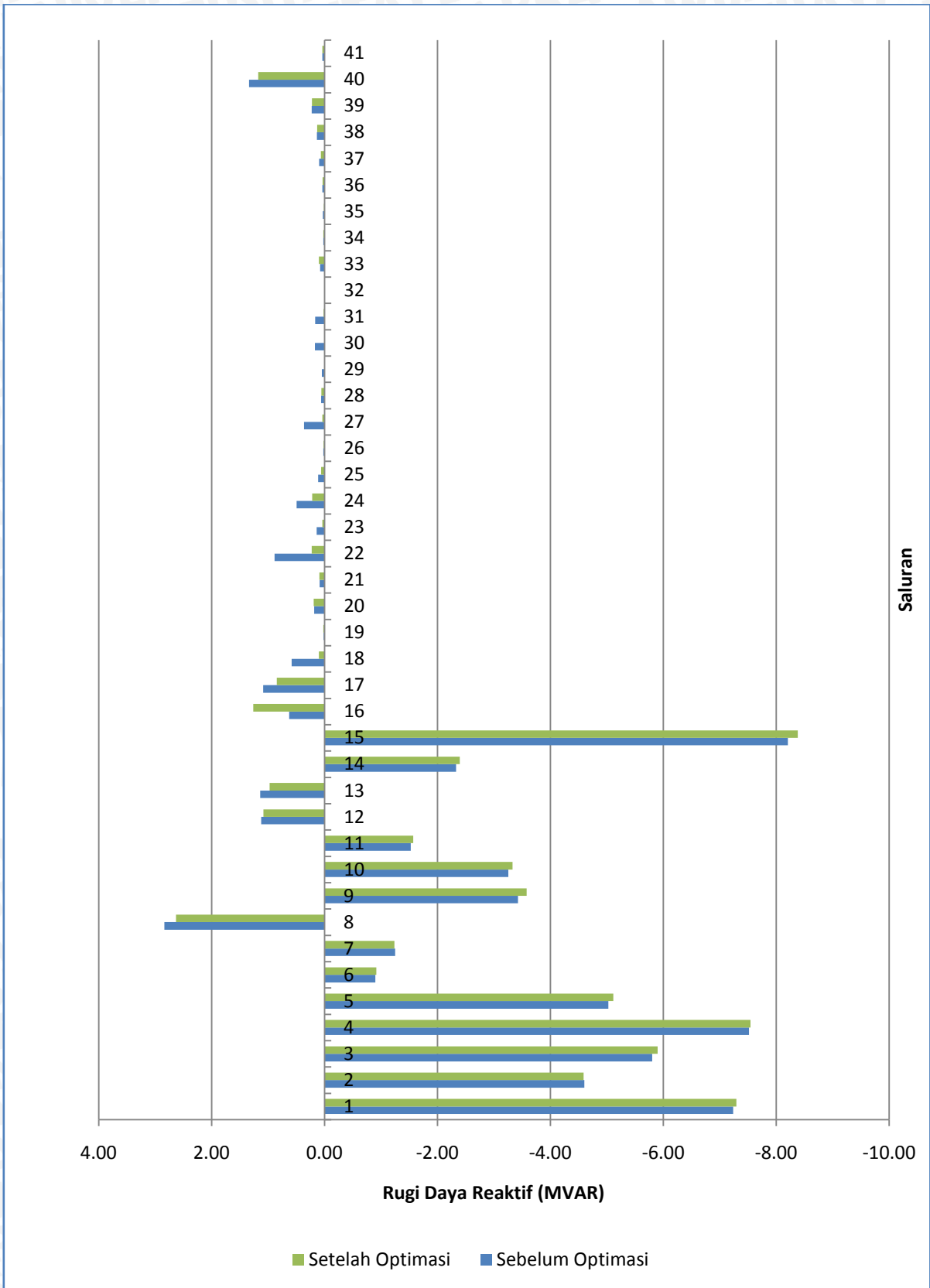
Perbandingan rugi daya aktif dan rugi daya reaktif sebelum dan setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC dapat dilihat pada Gambar 4.12 dan Gambar 4.13.







Gambar 4. 12. Rugi Daya Aktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC



Gambar 4. 13. Rugi Daya Reaktif Sebelum dan Setelah Optimasi Penempatan SVC dan TCSC

Dari Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 diatas dapat dilihat perbandingan rugi daya aktif dan reaktif tiap saluran. Rugi daya aktif terbesar terjadi pada saluran 1 yang menghubungkan bus 1 dan bus 2, sedangkan rugi daya reaktif terbesar terjadi pada saluran 15 yang menghubungkan bus 8 dan bus 28. Setelah dilakukan optimasi penempatan SVC dan TCSC dengan metode RGA terjadi penurunan total rugi daya aktif sebesar 13,8% yaitu dari 5,791 MW menjadi 4,992 MW. Sedangkan untuk rugi daya reaktif mengalami kenaikan sebesar 8,3% yaitu dari -38,913MVAR menjadi -42,142MVAR.

Dari simulasi didapatkan lokasi yang optimal untuk menempatkan SVC dan TCSC sekaligus kapasitas SVC dan rating TCSC yang digunakan agar rugi daya yang dihasilkan oleh sistem seminimal mungkin. Lokasi dan kapasitas optimal untuk penempatan SVC dan TCSC pada sistem standar IEEE 30 bus ditunjukkan pada Tabel 4.32 dan Tabel 4.33.

Tabel 4. 32. Lokasi dan Kapasitas Optimal SVC

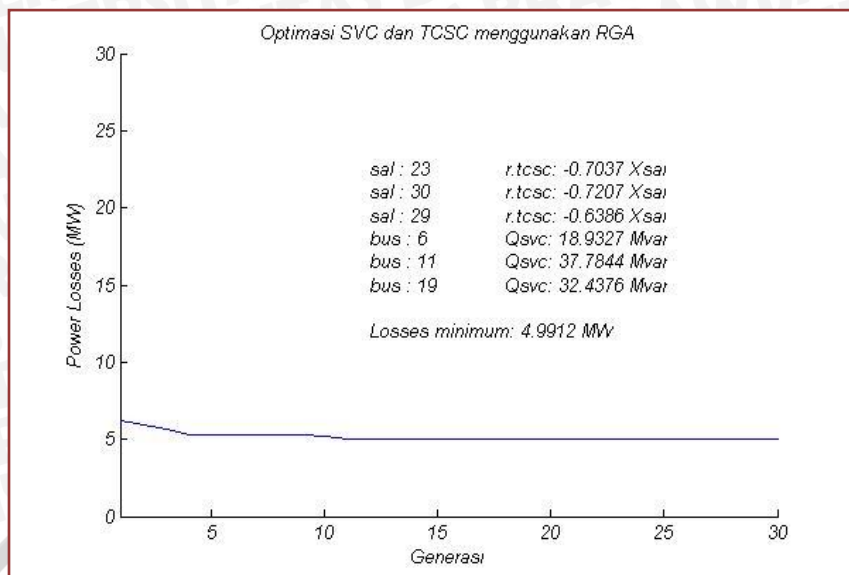
Lokasi SVC	Nama Bus	Kapasitas SVC (MVAR)
Bus 15	Tasikmalaya	197,9056
Bus 19	Ungaran	170,0902
Bus 20	Pedan	171,5663

Tabel 4. 33. Lokasi dan Rating Optimal TCSC

Lokasi TCSC			Rating TCSC (Xsal)
Saluran	Dari	Ke	
15	12	13	-0,7711
21	19	18	-0,7709
31	26	25	-0,7708

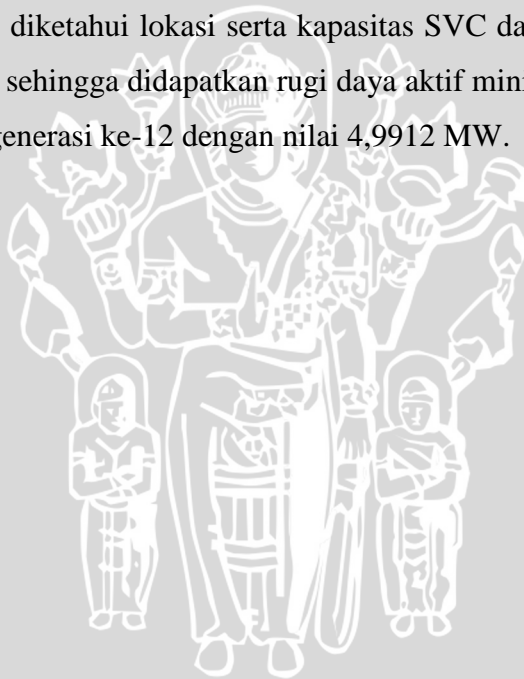
Grafik perubahan rugi daya aktif dari setiap generasi pada simulasi optimasi penempatan SVC dan rating TCSC pada sistem menggunakan metode RGA ditunjukkan pada Gambar 4.14.





Gambar 4. 14. Grafik Konvergensi RGA untuk Penempatan SVC dan TCSC

Dari grafik diatas dapat diketahui lokasi serta kapasitas SVC dan TCSC yang optimal untuk melakukan kompensasi sehingga didapatkan rugi daya aktif minimum. Besar rugi daya aktif minimum didapat pada generasi ke-12 dengan nilai 4,9912 MW.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan pada sistem Jawa-Bali 500 kV dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Lokasi dan kapasitas optimal untuk penempatan SVC yaitu pada bus 15 (Tasikmalaya), 20 (Pedan), dan 25 (Kediri) dengan kapasitas masing-masing 211,000 MVAR, 135,725 MVAR, dan 229,375 MVAR pada pembebanan 100% dan 234,905 MVAR, 243,120 MVAR, dan 235,524 MVAR pada pembebanan 80%. Lokasi dan rating optimal untuk penempatan TCSC yaitu pada saluran 17 yang menghubungkan bus 14 (Saguling) dan bus 16 (Bandung Selatan), saluran 20 yang menghubungkan bus 17 (Mandicaran) dan bus 19 (Ungaran) dan saluran 21 yang menghubungkan bus 19 (Ungaran) dan bus 18 (Tanjung Jati) dengan rating masing-masing  $-0,7699X_{line}$ ,  $-0,7697X_{line}$ , dan  $-0,7703X_{line}$  pada pembebanan 100% dan  $-0,0118X_{line}$ ,  $0,0525X_{line}$ , dan  $-0,7474X_{line}$  pada pembebanan 80%.
2. Optimasi penempatan SVC dan TCSC menggunakan metode RGA mampu mengurangi rugi daya aktif sebesar 10,65% dari 154,486 MW menjadi 138,035 MW, dan mengurangi rugi daya reaktif sebesar 35,36% dari 1.591,582 MVAR menjadi 1.028,665 MVAR pada sistem dengan pembebanan 100%. Sedangkan untuk sistem dengan pembebanan 80% mampu mengurangi rugi daya aktif sebesar 7,78% dari 94,284 MW menjadi 86,964 MW, dan mengurangi rugi daya reaktif sebesar 24,08% dari 958,645 MVAR menjadi 727,786 MVAR.
3. Optimasi penempatan SVC dan TCSC menggunakan metode RGA mampu memperbaiki tegangan tiap bus pada sistem. Khususnya pada bus-bus yang mempunyai kondisi tegangan di bawah batas standar (*undervoltage*) sehingga dapat memenuhi batas tegangan yang diijinkan ( $0,95 \leq V_{bus} \leq 1,05$  p.u).

## 5.2. Saran

Beberapa saran yang bertujuan untuk perbaikan penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Metode yang digunakan untuk optimasi dapat dikembangkan dengan menggunakan metode *hybrid*, seperti RGA dengan PSO (*Particel Swarm Optimization*) atau yang lainnya.
2. Untuk kompensasi dapat menggunakan koordinasi FACTS *devices* yang lainnya.
3. Dapat dikembangkan untuk kondisi sistem dengan kontingensi atau dengan mengalami gangguan lainnya.
4. Mempertimbangkan fungsi biaya, seperti fungsi biaya pembangkitan dan fungsi biaya peralatan FACTS.





## DAFTAR PUSTAKA

- Acha, E., dkk. 2004. *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*. England: John Wiley & Sons Ltd.
- Glanzmann, G. & Andersson, G. 2004. *Coordinated Control of FACTS Devices base on Optimal Power Flow*.
- Grainger, J. J. & Stevenson, W. D., JR. 1994. *Power System Analysis*. Singapore : McGraw-Hill.
- Herrera, F dkk. 1998. *Tackling Real-Coded Genetic Algorithm: Operators and Tools for Behavioural Analysis*. Granada: Kluwer Academic Publishers.
- Hosea, E. & Tanoto, Y. 2004. *Perbandingan Analisa Aliran Daya dengan Menggunakan Metode Algoritma Genetika dan Metode Newton-Raphson*. Jurnal Teknik Elektro Vol.4 No.2. Surabaya: Universitas Kristen Petra.
- Hutauruk, T. 1994. *Transmisi Daya Elektrik*. Jakarta: Erlangga.
- Jumaat, S. A., dkk. 2012. *Optimal Placement and Sizing of Multiple FACTS Devices Installation*. IEEE International Conference on Power and Energy. Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, 2-5 Desember 2012.
- Kundur, P. 1993. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill: International Edition.
- Kusumadewi, S. 2005. *Penyelesaian Masalah Optimasi dengan Teknik-Teknik Heuristik*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Mahmudy, W.F & Rahman, M.A. 2011. *Optimasi Fungsi Multi-Obyektif Berkendala Menggunakan Algoritma Genetika Adaptif dengan Pengkodean Real..* Malang: Universitas Brawijaya.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. 2007. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3 Tahun 2007 : Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali*. Jakarta : Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Padiyar, K. 2007. *FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution*. New Delhi: New Age International Publishers.
- Robandi, Imam. 2006. *Desain Sistem Tenaga Modern*. Yogyakarta: ANDI.
- Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*. McGraw-Hill: International Edition.

- Sadikovic, Rusejla. 2006. *Use of FACTS Devices for Power Flow Control and Damping of Oscillation in Power System*. Dissertation. Institute of Technology Zurich, Swiss.
- Supriatna, G. 2013. *Optimasi Sistem Interkoneksi 500 kV Jawa – Bali dengan Aliran Daya Optimal MINOPF*. Tugas Akhir. UPI, Bandung.
- Suyanto. 2005. *Algoritma Genetika Dalam Matlab*. Bandung: Informatika.
- Suyanto. 2007. *Artificial Intelligence*. Bandung: Informatika.



# LAMPIRAN 1

## LISTING PROGRAM ALIRAN DAYA METODE NEWTON-RAPHSON





```

tic
basemva=1000;accuracy=0.001;maxiter=200;accel=1.2;xload=1.0;
% Sistem 500kv Jawa Madura Bali (7 Mei 2013 pukul 10.00 WIB) :
%
%           Bus Bus   Voltage Angle   -----Load-----
Generator-----   Injected
% No  code Mag.  Degree      MW      Mvar      MW      Mvar  Qmin  Qmax
Mvarbusdata=
[101.0000.086.034.00.00.0000%NewSuralaya
211.0200.0142.0-56.02962.01554.0-60017000%Suralaya
301.0000.0320.0-139.00.00.0000%Cilegon
401.0000.0676.0213.00.00.0000%Kembangan
501.0000.0722.047.00.00.0000%Gandul
601.0000.0636.0253.00.00.0000%Balaraja
701.0000.0473.0350.00.00.0000%Cibinong
801.0000.0343.097.00.00.0000%Cawang
901.0000.01097.079.00.00.0000%Bekasi
1001.0000.0536.0166.00.00.0000%Depok
1121.0000.00.00.01351.0703.0-7008000%Muara Tawar
1201.0000.0666.0463.00.00.0000%Cibatu
1321.0000.0650.0270.0365.0120.0-4803000%Cirata
1421.0250.00.00.0647.0135.0-1401500%Saguling
1501.0000.0137.048.00.00.0000%Tasikmalaya
1601.0000.0505.0325.00.00.0000%BandungSelatan
1701.0000.0339.03.00.00.0000%Mandiracan
1821.0000.0380.096.02385.0336.0-2405000%TanjungJati
1901.0000.0838.0382.00.00.0000%Ungaran
2001.0000.0631.0430.00.00.0000%Pedan
2101.0000.0262.043.00.00.0000%Ngimbang
2201.0000.0983.0642.00.00.0000%Surabaya Barat
2321.0000.0146.021.0590.0111.0-6102000%Gresik
2421.0250.0430.0205.0325.044.0-502500%Grati
2501.0000.0605.0197.00.00.0000%Kediri
2621.0000.0593.0144.03025.0551.0-1006000];%Paiton

```

DATA SALURAN JAWA-MADURA-BALI

Vrate	Bus bus R			X			1/2 B		KODE SALURAN
	nl	nr	p.u.	p.u.	p.u.	tr.	tap	at bus	

```

linedata=
[210.0001465000.001407500.00568383701500
230.0006264920.007008760.00114142901500
260.0036776800.035333200.00022641601500
370.0131333240.146925800.00005444951500
540.0015130400.016926880.00047262101500
560.0029802240.028622840.00027949701500
7140.0041113200.045995200.00017393101500
970.0044418800.042675400.00018746201500
980.0019736480.018961840.00042190001500
1050.0003470800.003334680.00239903101500
1070.0009124000.008765920.00091262601500
1170.0062116000.059678000.00013405301500
1180.0056256000.054048000.00014801701500

```



```

12110.0028220520.027112880.00029506301500
12130.0027398880.026182760.00030554501500
14130.0014747280.014168460.00056463501500
14160.0019578000.0219023960.00036525701500
15100.0140561600.157248040.00005087501500
17160.0069909800.067165880.00011910801500
17190.0134780000.129490000.00006178101500
19180.0067670800.075703680.00010567501500
19200.0090361200.086814600.00009215051500
19210.0234796160.225580600.00003546411500
20150.0153110000.171286240.00004670551500
21220.0059749720.057404600.00013936201500
22190.0297922400.286229200.00002794971500
22240.0039863600.044596600.00017938601500
23220.0014005600.013455720.00059454301500
25200.0102911000.1151279760.00006948801500
26240.0042177280.047184760.00016954701500
26250.0102911000.1151279760.00006948801500];

```

```

busdata(:,5)=busdata(:,5).*xload;%x.load = prosentase pembebanan
busdata(:,6)=busdata(:,6).*xload;
busdata(:,7)=busdata(:,7).*xload;
busdata(:,8)=busdata(:,8).*xload;
Ploadmax=sum(busdata(:,5).*xload);
Pgenmax=sum(busdata(:,7));%total daya aktif generator
Qgenmax=sum(busdata(:,8));%total daya reaktif generator
j=sqrt(-1);i=sqrt(-1);
nl=linedata(:,1);nr=linedata(:,2);R=linedata(:,3);
X=linedata(:,4);Bc=j*linedata(:,5);a=linedata(:,6);
nbr=length(linedata(:,1));nbus=max(max(nl),max(nr));
Z=R+j*X;y=ones(nbr,1)./Z;%branch admittance
for n=1:nbr
    if a(n)<=0 a(n)=1;else end
Ybus=zeros(nbus,nbus);% initialize Ybus to zero
% formation of the off diagonal elements
for k=1:nbr;
    Ybus(nl(k),nr(k))=Ybus(nl(k),nr(k))-y(k)/a(k);
    Ybus(nr(k),nl(k))=Ybus(nl(k),nr(k));
end
end
% formation of the diagonal elements
for n=1:nbus
    for k=1:nbr
        if nl(k)==n
            Ybus(n,n)=Ybus(n,n)+y(k)/(a(k)^2)+Bc(k);
        elseif nr(k)==n
            Ybus(n,n)=Ybus(n,n)+y(k)+Bc(k);
        else, end
    end
end
clear Pgg
% Power flow solution by Newton-Raphson method
% Copyright (c) 1998 by H. Saadat
ns=0;ng=0;Vm=0;delta=0;yload=0;deltad=0;
nbus=length(busdata(:,1));
for k=1:nbus
    n=busdata(k,1);
    kb(n)=busdata(k,2);Vm(n)=busdata(k,3);delta(n)=busdata(k,4);
    Pd(n)=busdata(k,5);Qd(n)=busdata(k,6);Pg(n)=busdata(k,7);

```

```

Qg(n)=busdata(k,8);
Qmin(n)=busdata(k,9);Qmax(n)=busdata(k,10);
Qsh(n)=busdata(k,11);
PV_bus=find(busdata(k,2))==2;
busdata_awal=busdata;
ifVm(n)<=0Vm(n)=1.0;V(n)=1+j*0;
elsedelta(n)=pi/180*delta(n);
V(n)=Vm(n)*(cos(delta(n))+j*sin(delta(n)));
P(n)=(Pg(n)-Pd(n))/basemva;
Q(n)=(Qg(n)-Qd(n)+Qsh(n))/basemva;
S(n)=P(n)+j*Q(n);
end
end
fork=1:nbus
ifkb(k)==1,ns=ns+1;else,end
ifkb(k)==2ng=ng+1;else,end
ngs(k)=ng;
nss(k)=ns;
end
Ym=abs(Ybus);t=angle(Ybus);
m=2*nbus-ng-2*ns;
maxerror=1;converge=1;
iter=0;
% Start of iterations
clearADCJDX
whilemaxerror>=accuracy&iter<=maxiter% Test for max. power mismatch
fori=1:m
fork=1:m
A(i,k)=0;%Initializing Jacobian matrix
end,end
iter=iter+1;
forn=1:nbus
nn=n-nss(n);
lm=nbus+n-ngs(n)-nss(n)-ns;
J11=0;J22=0;J33=0;J44=0;
fori=1:nbr
ifn1(i)==n|nr(i)==n
ifn1(i)==n,l=nr(i);end
ifnr(i)==n,l=n1(i);end
J11=J11+Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)-delta(n)+delta(l));
J33=J33+Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)-delta(n)+delta(l));
ifkb(n)~=1
J22=J22+Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)-delta(n)+delta(l));
J44=J44+Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)-delta(n)+delta(l));
else,end
ifkb(n)~=1&kb(l)~=1
lk=nbus+l-ngs(l)-nss(l)-ns;
ll=l-nss(l);
% off diagonalelements of J1
A(nn,ll)=-Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)-delta(n)+delta(l));
ifkb(l)==0% off diagonal elements of J2
A(nn,lk)=Vm(n)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)-delta(n)+delta(l));end
ifkb(n)==0% off diagonal elements of J3
A(lm,ll)=-Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)-delta(n)+delta(l));end
ifkb(n)==0&kb(l)==0% off diagonal elements of J4
A(lm,lk)=-Vm(n)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)-delta(n)+delta(l));end
elseend
else,end
end

```



```

Pk=Vm(n)^2*Ym(n,n)*cos(t(n,n))+J33;
Qk=-Vm(n)^2*Ym(n,n)*sin(t(n,n))-J11;
ifkb(n)==1P(n)=Pk;Q(n)=Qk;end% Swing bus P
ifkb(n)==2Q(n)=Qk;
ifQmax(n)~=0
Qgc=Q(n)*basemva+Qd(n)-Qsh(n);
ifiter<=7% Between the 2th & 6th iterations
ifiter>2% the Mvar of generator buses are
ifQgc<Qmin(n),% tested. If not within limits Vm(n)
Vm(n)=Vm(n)+0.01;% is changed in steps of 0.01 pu to
elseifQgc>Qmax(n),% bring the generator Mvar within
Vm(n)=Vm(n)-0.01;end% the specified limits.
else,end
else,end
else,end
end
ifkb(n)~=1
A(nn,nn)=J11;%diagonal elements of J1
DC(nn)=P(n)-Pk;
end
ifkb(n)==0
A(nn,lm)=2*Vm(n)*Ym(n,n)*cos(t(n,n))+J22;%diagonalelements of J2
A(lm,nn)=J33;%diagonal elements of J3
A(lm,lm)=-2*Vm(n)*Ym(n,n)*sin(t(n,n))-J44;%diagonal of elements of J4
DC(lm)=Q(n)-Qk;
end
end
DX=A\DC';
for n=1:nbus
nn=n-nss(n);
lm=nbus+n-ngs(n)-nss(n)-ns;
ifkb(n)~=1
delta(n)=delta(n)+DX(nn);end
ifkb(n)==0
Vm(n)=Vm(n)+DX(lm);end
end
maxerror=max(abs(DC));
if iter==maxiter & maxerror>accuracy
fprintf('\nWARNING: Iterative solution did not converged after ')
fprintf('%g',iter),fprintf(' iterations.\n\n')
fprintf('Press Enter to terminate the iterations and print the results\n\n')
converge=0;pause,else,end

```

end

```

ifconverge~=1
tech=(' ITERATIVE SOLUTION DID NOT CONVERGE');else,
tech=(' Power Flow Solution by Newton-Raphson Method');
end

```

```

V=Vm.*cos(delta)+j*Vm.*sin(delta);
deltad=180/pi*delta;
i=sqrt(-1);
k=0;
for n=1:nbus
ifkb(n)==1
k=k+1;
S(n)=P(n)+j*Q(n);

```

```

Pg(n)=P(n)*basemva+Pd(n);
Qg(n)=Q(n)*basemva+Qd(n)-Qsh(n);
Pgg(k)=Pg(n);
Qgg(k)=Qg(n);%june 97
elseif kb(n)==2
k=k+1;
S(n)=P(n)+j*Q(n);
Qg(n)=Q(n)*basemva+Qd(n)-Qsh(n);
Pgg(k)=Pg(n);
Qgg(k)=Qg(n);% June 1997
end
yload(n)=(Pd(n)-j*Qd(n)+j*Qsh(n))/(basemva*Vm(n)^2);
end
busdata(:,3)=Vm';busdata(:,4)=deltad';
Pgt=sum(Pg);Qgt=sum(Qg);Pdt=sum(Pd);Qdt=sum(Qd);Qsht=sum(Qsh);

%clear A DC DX J11 J22 J33 J44 Qk delta lk ll lm
%clear A DC DX J11 J22 J33 Qk delta lk ll lm
% This program prints the power flow solution in a tabulated form
% on the screen.
%
% Copyright (C) 1998 by H. Saadat.

disp(tech)
%% display_bus_Voltage
%File ini digunakan untuk menampilkan tegangan pada setiap bus pada screen
fprintf('          Power Mismatch Maximum = %g \n\n',maxerror)
fprintf('          Jumlah Iterasi          = %g \n\n',iter)
head=['
=====
===='
'   No.   Tegangan   Sudut   -----Beban-----   -----Pembangkitan----
Injeksi'
'   Bus   Magnitude   Degree   MW       Mvar       MW       Mvar
Mvar '
'
=====
===='];
disp(head)
for n=1:nbus
fprintf(' %4g',n),fprintf(' %9.3f',Vm(n)),
fprintf(' %11.3f',deltad(n)),fprintf(' %10.3f',Pd(n)),
fprintf(' %9.3f',Qd(n)),fprintf(' %9.3f',Pg(n)),
fprintf(' %11.3f',Qg(n)),fprintf(' %8.3f\n',Qsh(n))
end
fprintf('
=====')
;
fprintf('          \n'),fprintf('          Total          ')
fprintf(' %10.3f',Pdt),fprintf(' %9.3f',Qdt),
fprintf(' %9.3f',Pgt),fprintf(' %9.3f',Qgt),fprintf(' %9.3f\n\n',Qsht)
fprintf(' \n
===== \n
\n')

% file:display_power_flow
%File ini berfungsi untuk menampilkan load flow antara setiap bus

```

```

SLT=0;
fprintf('\n')
fprintf('
                                ALIRAN DAYA DAN RUGI-RUGI PADA SALURAN \n\n')
head=['
=====
'      -Saluran-          Daya pada bus & aliran daya          Rugi pada Saluran
'      Dari   Ke          MW          Mvar          MVA          MW          Mvar
'
=====
'];

disp(head)
SLT=0;
for n=1:nbus
busprt=0;
for L=1:nbr;
%       no.sal(L,1)=L;
if busprt==0
fprintf('      \n'), fprintf('%6g', n), fprintf('          %12.3f', P(n)*basemva)
fprintf('%12.3f', Q(n)*basemva), fprintf('%12.3f\n', abs(S(n)*basemva))

busprt=1;
else, end
if nl(L)==nk==nr(L);
In=(V(n)-a(L)*V(k))*y(L)/a(L)^2+Bc(L)/a(L)^2*V(n);
Ik=(V(k)-V(n)/a(L))*y(L)+Bc(L)*V(k);
Snk=V(n)*conj(In)*basemva;
Skn=V(k)*conj(Ik)*basemva;
SL=Snk+Skn;
SLT=SLT+SL;
Sloss(L,1)=SL;
elseif nr(L)==nk==nl(L);
In=(V(n)-V(k)/a(L))*y(L)+Bc(L)*V(n);
Ik=(V(k)-a(L)*V(n))*y(L)/a(L)^2+Bc(L)/a(L)^2*V(k);
Snk=V(n)*conj(In)*basemva;
Skn=V(k)*conj(Ik)*basemva;
SL=Snk+Skn;
SLT=SLT+SL;
Sloss(L,1)=SL;
else, end
if nl(L)==n|nr(L)==n
fprintf('%12g', k),
fprintf('%12.3f', real(Snk)), fprintf('%12.3f', imag(Snk))
fprintf('%12.3f', abs(Snk)),
fprintf('%12.3f', real(SL)),
if nl(L)==n&a(L)~=1
fprintf('%10.3f', imag(SL)), fprintf('%10.3f\n', a(L))
else, fprintf('%10.3f\n', imag(SL))
end
else, end
end
end
SLT=SLT/2;
fprintf('
=====
');
fprintf('      \n'), fprintf('
                                Total rugi-rugi
')

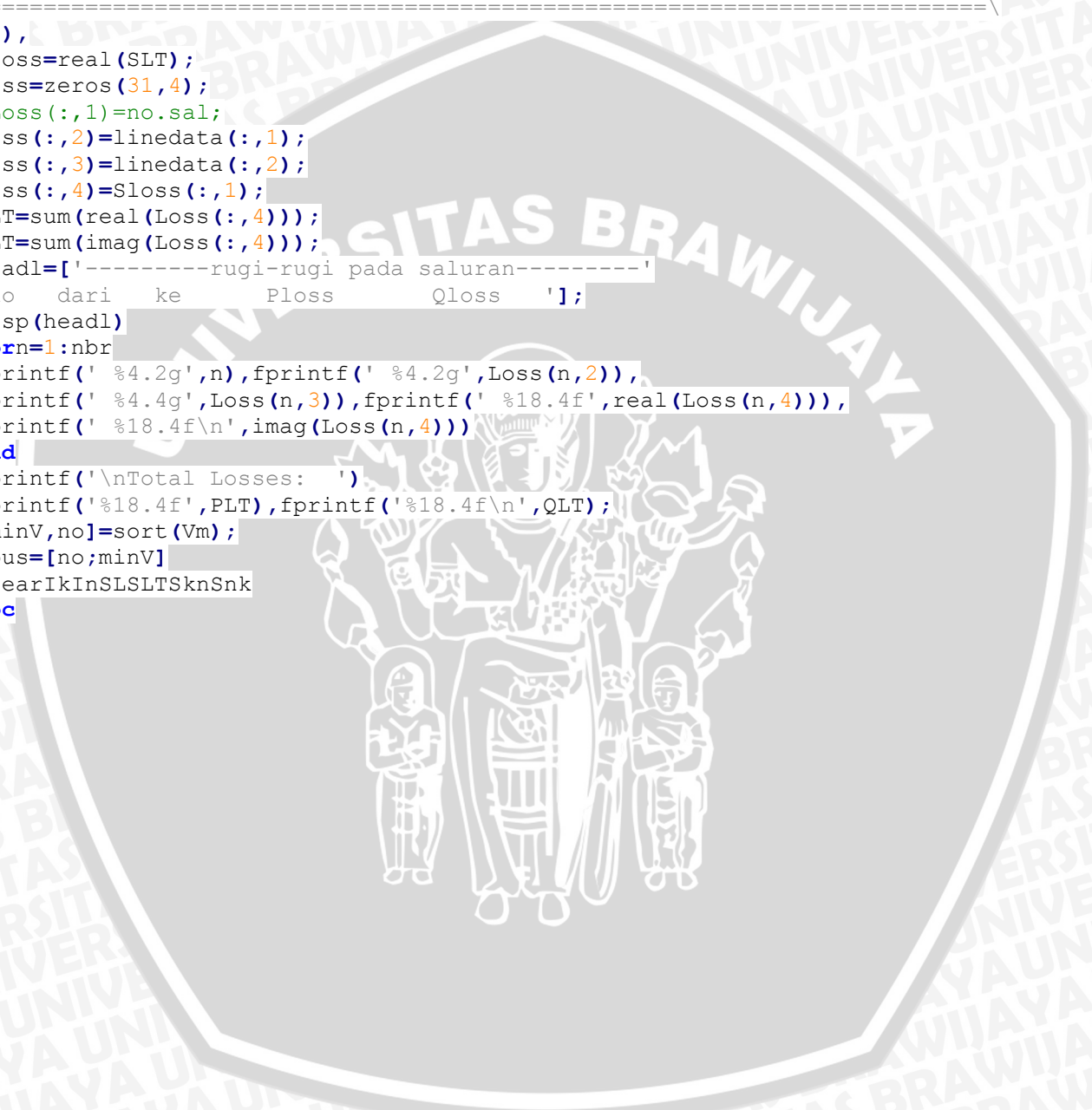
```



```

fprintf('%11.3f',real(SLT)),
fprintf('%10.3f\n
=====
n',imag(SLT))
fprintf('          Prosentase Losses          ')
fprintf(' %10.3f',(real(SLT)/Pgt)*100),
fprintf(' %11.3f\n',(imag(SLT)/Qgt)*100)
fprintf('
=====
n'),
Ploss=real(SLT);
Loss=zeros(31,4);
%Loss(:,1)=no.sal;
Loss(:,2)=linedata(:,1);
Loss(:,3)=linedata(:,2);
Loss(:,4)=Sloss(:,1);
PLT=sum(real(Loss(:,4)));
QLT=sum(imag(Loss(:,4)));
headl=['-----rugi-rugi pada saluran-----']
'no   dari   ke   Ploss   Qloss   '];
disp(headl)
for n=1:nbr
fprintf(' %4.2g',n),fprintf(' %4.2g',Loss(n,2)),
fprintf(' %4.4g',Loss(n,3)),fprintf(' %18.4f',real(Loss(n,4))),
fprintf(' %18.4f\n',imag(Loss(n,4)))
end
fprintf('\nTotal Losses: ')
fprintf('%18.4f',PLT),fprintf('%18.4f\n',QLT);
[minV,no]=sort(Vm);
vbus=[no;minV]
clearIkInSLSLTSknSnk
toc

```



## LAMPIRAN 2

### LISTING PROGRAM IMPLEMENTASI RGA PADA SISTEM JAWA-BALI 500 kV



```

clear
clc
tic
ukpop=20;
maxG=30;
pc=0.8;
pm=0.1;
nSVC=3;
nTCSC=3;
Qsvcm=0;
Qsvcm=250;
rmin=-0.8;
rmax=0.2;
nfacts=nSVC+nTCSC;
jumgen=2*nfacts;
nbus=26;
nsal=31;
Va=1.05;
Vb=0.95;
bil=0.001;
Fthr=1/bil;
ymax=160;
ymin=50;

```

```
%inisialisasi grafis 2D
```

```

hfig=figure;
hold on
title('Optimasi SVC dan TCSC menggunakan RGA')
set(hfig,'position',[50,50,600,400]);
set(hfig,'doublebuffer','on');
axis([1 maxG ym in ym ax]);
hbestplot=plot(1:maxG,zeros(1,maxG));
htextl1=text(0.4*maxG,0.10*ymax+ymin,sprintf('bus : %1g',0.0));
htextl2=text(0.4*maxG,0.14*ymax+ymin,sprintf('bus : %1g',0.0));
htextl3=text(0.4*maxG,0.18*ymax+ymin,sprintf('bus : %1g',0.0));
htextl4=text(0.4*maxG,0.22*ymax+ymin,sprintf('sal : %1g',0.0));
htextl5=text(0.4*maxG,0.26*ymax+ymin,sprintf('sal : %1g',0.0));
htextl6=text(0.4*maxG,0.30*ymax+ymin,sprintf('sal : %1g',0.0));
htextk1=text(0.6*maxG,0.10*ymax+ymin,sprintf('Qsvc : %5.4f',0.0));
htextk2=text(0.6*maxG,0.14*ymax+ymin,sprintf('Qsvc : %5.4f',0.0));
htextk3=text(0.6*maxG,0.18*ymax+ymin,sprintf('Qsvc : %5.4f',0.0));
htextk4=text(0.6*maxG,0.22*ymax+ymin,sprintf('r.tcsc : %2.4f',0.0));
htextk5=text(0.6*maxG,0.26*ymax+ymin,sprintf('r.tcsc : %2.4f',0.0));
htextk6=text(0.6*maxG,0.30*ymax+ymin,sprintf('r.tcsc : %2.4f',0.0));
htextloss=text(0.4*maxG,0.40*ymax+ymin,sprintf('Losses minimum: %5.4f',0.0));
xlabel('Generasi');
ylabel('Power Losses (MW)');
hold off
drawnow;

```

```
%inisialisasi populasi
```

```

forj=1:ukpop,
a=randperm(nbus);
b=randperm(nsal);
lokasi_SVC=a(1,1:nSVC);
lokasi_TCSC=b(1,1:nTCSC);
rating_SVC=rand(1,nSVC);

```



```

rating_TCSC=rand(1,nTCSC);
lokasi=[lokasi_SVClokasi_TCSC];
rating=[rating_SVCrating_TCSC];
k=[lokasirating];
pop_awal(j,1:2*nfacts)=k;
end
pop_awal;

%Loop Evolusi
for g=1:maxG,
generasi=g;
dekode_kromosom;%dekode kromosom
for h=1:ukpop;
loadflow_jamali_SVCdanTCSC;%evaluasi individu

lossP(h,1)=real(SLT);
lossQ(h,1)=imag(SLT);
%losses=lossP+i*lossQ;
Fitnes=1000./lossP;
end

maxF=Fitnes(1);
minF=Fitnes(1);
indeks_best_individu=1;
for ii=2:ukpop,
if Fitnes(ii)>maxF,
maxF=Fitnes(ii);
indeks_best_individu=ii;
end
if Fitnes(ii)<minF,
minF=Fitnes(ii);
end
end
Best_krom=popfacts(indeks_best_individu,:);
minloss=1000/maxF;
%penanganan grafis 2D
plotvector=get(hbestplot,'Ydata');
plotvector(g)=minloss;
set(hbestplot,'Ydata',plotvector);
set(htextl1,'string',sprintf('bus : %1g ',Best_krom(1))); %Lokasi_SVC1
set(htextl2,'string',sprintf('bus : %1g ',Best_krom(2))); %Lokasi_SVC2
set(htextl3,'string',sprintf('bus : %1g ',Best_krom(3))); %Lokasi_SVC3
set(htextl4,'string',sprintf('sal : %1g ',Best_krom(nSVC+1)));
%Lokasi_TCSC1
set(htextl5,'string',sprintf('sal : %1g ',Best_krom(nSVC+2)));
%Lokasi_TCSC2
set(htextl6,'string',sprintf('sal : %1g ',Best_krom(nSVC+3)));
%Lokasi_TCSC3
set(htextk1,'string',sprintf('Qsvc: %5.4f Mvar',Best_krom(nfacts+1)));
%Kapasitas_SVC1
set(htextk2,'string',sprintf('Qsvc: %5.4f Mvar',Best_krom(nfacts+2)));
%Kapasitas_SVC2
set(htextk3,'string',sprintf('Qsvc: %5.4f Mvar',Best_krom(nfacts+3)));
%Kapasitas_SVC3
set(htextk4,'string',sprintf('r.tcsc: %2.4f
Xsal',Best_krom(nfacts+nSVC+1))); %Rating_TCSC1

```

```

set(htextk5,'string',sprintf('r.tcsc: %2.4f
Xsal',Best_krom(nfacts+nSVC+2))); %Rating_TCSC2
set(htextk6,'string',sprintf('r.tcsc: %2.4f
Xsal',Best_krom(nfacts+nSVC+3))); %Rating_TCSC3
set(htextloss,'string',sprintf('Losses minimum: %5.4f MW',minloss));
drawnow
ifmaxF>=Fthr,
break;
end
tem_pop=pop_awal;
%elitisme
ifmod(ukpop,2)==0 %ukpop genap | mod=sisa pembagian
IterasiMulai=3;
tem_pop(1,:)=pop_awal(indeks_best_individu,:);
tem_pop(2,:)=pop_awal(2,:);
else
IterasiMulai=2;
tem_pop(1,:)=pop_awal(indeks_best_individu,:);
end
%Linear Fitnes Ranking
[SF,IndF]=sort(Fitnes);
forrr=1:ukpop,
LFR(IndF(ukpop-rr+1))=ukpop-(ukpop-1)*((rr-1)/(ukpop-1));
end

%Roulette-Wheel dan pindah silang
forjj=IterasiMulai:2:ukpop,
IP1=Roulette_Wheel(ukpop,LFR);
IP2=Roulette_Wheel(ukpop,LFR);
if(rand<pc),%dilakukan crossover
Bapak=pop_awal(IP1,:);
lok1=Bapak(1,1:nfacts);%lokasi facts Bapak(lok1)
rat1=Bapak(1,nfacts+1:jumgen);%rating facts Bapak(rat1)
Ibu=pop_awal(IP2,:);
lok2=Ibu(1,1:nfacts);%lokasi facts Ibu(lok2)
rat2=Ibu(1,nfacts+1:jumgen);%rating facts Ibu(rat2)

forx=1:nSVC,%crossover lokasi dan rating SVC(1)
R1=rand;
R2=rand;
os1_lok(1,x)=ceil(R1*lok1(x)+(1-R1)*lok2(nSVC+1-x));%os=offspring/anak
os2_lok(1,x)=ceil(R2*lok2(x)+(1-R2)*lok1(nSVC+1-x));%lokasi SVC os1 & os2
os1_rat(1,x)=(R1*rat1(x)+(1-R1)*rat2(nSVC+1-x));%rating SVC os1 & os2
os2_rat(1,x)=(R2*rat2(x)+(1-R2)*rat1(nSVC+1-x));
end
forx=nSVC+1:nfacts,%crossover lokasi dan rating TCSC(2)
R1=rand;
R2=rand;
os1_lok(1,x)=ceil(R1*lok1(x)+(1-R1)*lok2(nfacts+1-x));%lokasi TCSC os1 &
os2
os2_lok(1,x)=ceil(R2*lok2(x)+(1-R2)*lok1(nfacts+1-x));
os1_rat(1,x)=(R1*rat1(x)+(1-R1)*rat2(nfacts+1-x));%rating TCSC os1 & os2
os2_rat(1,x)=(R2*rat2(x)+(1-R2)*rat1(nfacts+1-x));
end
Anak1=[os1_lokos1_rat];
Anak2=[os2_lokos2_rat];
tem_pop(jj,:)=Anak1;
tem_pop(jj+1,:)=Anak2;

```

```
else
tem_pop(jj,:)=pop_awal(jj,:);
tem_pop(jj+1,:)=pop_awal(jj+1,:);
end
end

%mutasi
mutasi;

%generational replacement
pop_awal=tem_pop;

best_individu1=populasi1(indeks_best_individu,:);
best_individu2=populasi2(indeks_best_individu,:);
LoadFlow_bestindividu;%Load flow individu terbaik

[minV,no]=sort(Vm);

end
vbus=[no;minV]
toc
```







# LAMPIRAN 3

TOPOLOGI JARINGAN SISTEM TENAGA LISRIK

JAWA-BALI 500 kV



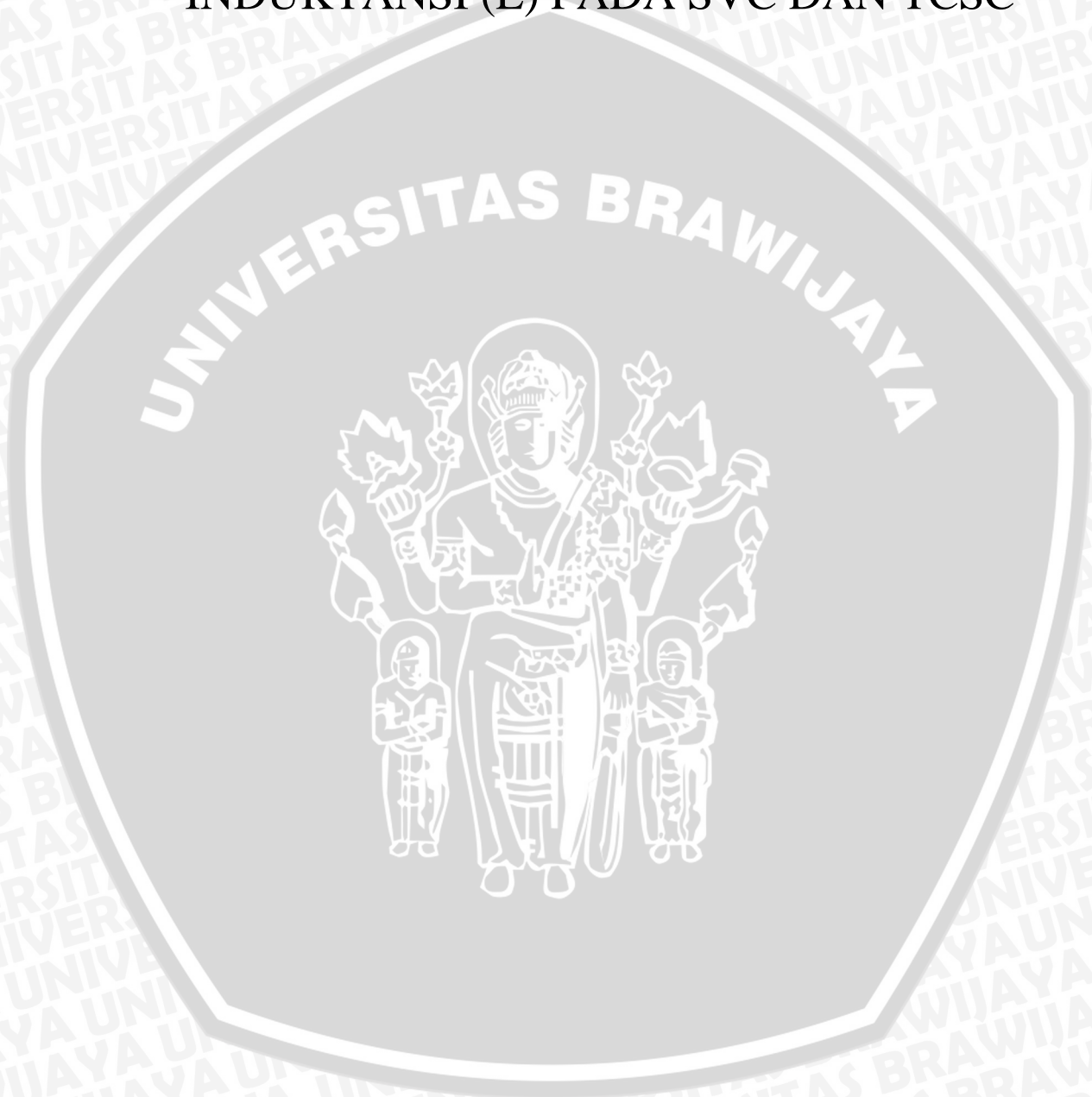


Sumber: PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) (2013)

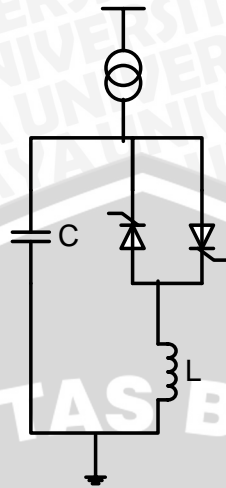


## LAMPIRAN 4

### PERHITUNGAN NILAI KAPASITANSI (C) DAN INDUKTANSI (L) PADA SVC DAN TCSC



1. Perhitungan nilai C dan L pada SVC



8. Gambar : Topologi dasar SVC

Pemasangan SVC pada system transmisi Jawa-Bali 500 kV digunakan trafo step-down 500/69 kV. Hal ini dikarenakan untuk SVC yang ada pada saat ini memiliki tegangan kerja maksimal 69 kV.

- Tegangan kerja SVC = 69 kV
- Qmin = -250 MVAR
- Qmax = 100 MVAR

Tyristor bekerja pada sudut penyalan 0° sampai 180° (Sadikovic, 2006: 31). Pada saat sudut penyalan thyristor 0° maka reaktansi SVC adalah

$$X_{SVC} = \frac{X_C \times X_L}{X_C + X_L}$$

Pada saat sudut penyalan thyristor 180° tidak ada arus yang mengalir pada induktor (I<sub>L</sub>=0), maka reaktansi SVC adalah

$$X_{SVC} = X_C$$

Pada saat sudut penyalan thyristor 180°:

$$Q_{SVC} = -BxV^2$$

$$-250 \text{ MVAR} = -Bx(69 \text{ kV})^2$$

$$B = 250 \text{ MVAR}/(69 \text{ kV})^2$$

$$= 0,0525$$

$$X_{SVC} = X_C = 1/B$$



$$X_C = 1/0,0525 \\ = 39,6825 \Omega$$

$$X_C = 1/\omega C$$

$$C = 1/\omega X_C \\ = 1/100\pi \times 39,6825$$

$$C = 80,2548 \mu F$$

Pada saat sudut penyalaaan thyristor  $0^\circ$  maka ada arus yang mengalir pada induktor, sehingga reaktansi SVC adalah

$$X_{SVC} = \frac{X_C \times X_L}{X_C + X_L}$$

$$Q_{SVC} = -B \times V^2$$

$$100 \text{ MVAR} = -B \times (69 \text{ kV})^2$$

$$B = 100 \text{ MVAR} / (69 \text{ kV})^2 \\ = 0,0210$$

$$X_{SVC} = 1/B$$

$$X_{SVC} = 1/0,0210 \\ = 47,61 \Omega$$

$$47,61 = \frac{-39,6825 \times X_L}{-39,6825 + X_L}$$

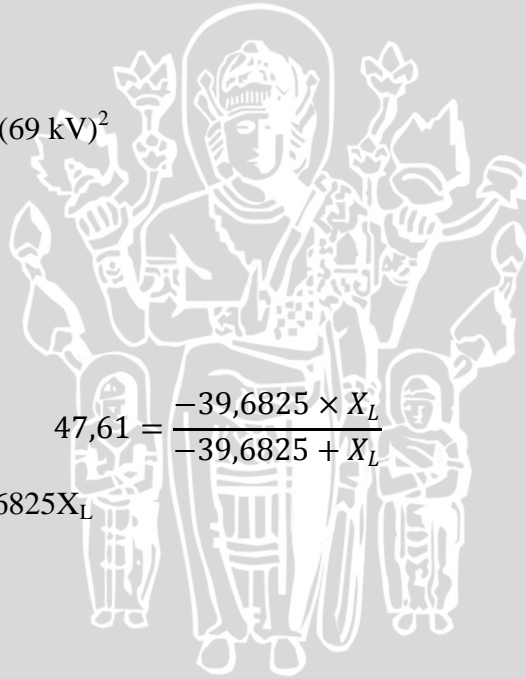
$$-1.889,2838 + 47,61X_L = -39,6825X_L$$

$$X_L = 21,6431 \Omega$$

$$X_L = \omega L$$

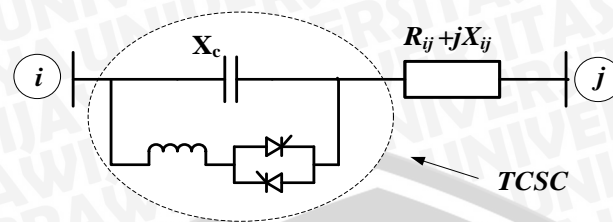
$$L = 21,6431/314$$

$$L = 68,927 \text{ mH}$$





## 2. Perhitungan nilai C dan L pada TCSC



Gambar: Rangkaian sederhana TCSC

Untuk mencegah terjadinya kompensasi berlebih TCSC diatur pada daerah kerja antara -0,8Xline sampai 0,2Xline.

Sehingga didapat hubungan rating TCSC dan reaktansi saluran.

$$X_{total} = X_{line} + X_{tcsc}$$

$$X_{tcsc} = r_{TCSC} + X_{line}$$

Sementara untuk pengoperasian thyristor sudut penyalan diatur dari  $0^\circ$  sampai  $90^\circ$ .

Persamaan ekuivalen yang merupakan hasil dari sudut penyalan ditunjukkan sebagai berikut (Glanzmann & Anderson, 2004:143):

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right)$$

$$B_c = \omega C$$

$$B_{eq} = B_L(\alpha) + B_c$$

$$X_{eq} = 1/B_{eq}$$

$$= \frac{1}{B_L(\alpha) + B_c}$$

Pada saat sudut penyalan thyristor  $90^\circ$ . Maka didapat:

$$B_L(\pi/2) = -\frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2 \cdot \pi/2}{\pi} - \frac{\sin(\pi)}{\pi} \right)$$

$$B_L(\pi/2) = -\frac{1}{\omega L} (1 - 1 - 0)$$

$$B_L(\pi/2) = 0$$

$$B_{eq} = \omega C$$

$$X_{eq} = 1/\omega C$$

Pada saat sudut penyalaan thyristor  $90^\circ$  maka tidak ada arus yang mengalir pada induktor sehingga reaktansi TCSC sama dengan reaktansi kapasitornya. TCSC bekerja pada rating minimalnya (kapasitif) yaitu  $-0,8X_{line}$ . Pada sistem Jawa-Bali nilai reaktansi saluran terbesar pada saluran 27 yaitu sebesar  $0,28623 \Omega$ .

$$\begin{aligned} X_{line} &= X_{line} \times Z_{base} \\ &= 0,28623 \times 250 \\ &= 71,5575 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{eq} &= -0,8X_{line} \\ &= -0,8 \times 71,5575 \\ &= -57,246 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_{eq} &= X_c = 1/\omega C \\ C &= 1/\omega X_c \\ &= 1/314 \times -57,246 \end{aligned}$$

$$C = 55,6321 \mu F$$

Pada saat sudut penyalaan  $0^\circ$  maka reaktansi ekuivalen :

$$X_{eq} = -\frac{1}{B_L(\alpha) + B_c}$$

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2.0}{\pi} - \frac{\sin(0)}{\pi} \right)$$

$$B_L(\pi/2) = -\frac{1}{\omega L} (1 - 0 - 0)$$

$$B_L(\pi/2) = -\frac{1}{\omega L}$$

$$B_{eq} = B_L(\alpha) + B_c$$

$$B_{eq} = -\frac{1}{\omega L} + \omega C$$

$$B_{eq} = 1/X_{eq}$$

$$\begin{aligned} X_{eq} &= 0,2X_{line} \\ &= 0,2 \times 71,5575 \end{aligned}$$



$$= 14,3115 \Omega$$

$$B_{eq} = 1/14,3115$$

$$= 0,06987$$

$$B_{eq} = -\frac{1}{\omega L} + \omega C$$

$$0,06987 = -\frac{1}{314L} + 314 \times 55,6321 \times 10^{-6}$$

$$\frac{1}{314L} = 0,017468 - 0,06987$$

$$L = 60,7746 \text{ mH}$$

