

# SKRIPSI

## **OPTIMASI PENEMPATAN MULTI FACTS DEVICE MENGUNAKAN METODE *BREEDER GENETIC ALGORITHM (BGA)* UNTUK MEREDUKSI RUGI - RUGI DAYA PADA SALURAN TRANSMISI 150 KV UPT. MALANG**



Disusun Oleh :

**FAUZI HAMZAH NASUTION**

**NIM : 05.12.021**



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
MARET 2010**

13710113

REKAM JEJAK PELUMBAAN MATAKIRAN HAKIPI  
(RUM) MATAKIRAN SISTEM KESEKUTUAN MATAKIRAN  
KAPITAN AGRI AGRI KUM - MATAKIRAN MATAKIRAN  
MATAKIRAN MATAKIRAN MATAKIRAN



MATAKIRAN MATAKIRAN

MATAKIRAN MATAKIRAN MATAKIRAN

MATAKIRAN MATAKIRAN

MATAKIRAN MATAKIRAN MATAKIRAN  
MATAKIRAN MATAKIRAN MATAKIRAN  
MATAKIRAN MATAKIRAN MATAKIRAN  
MATAKIRAN MATAKIRAN MATAKIRAN  
MATAKIRAN MATAKIRAN

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**OPTIMASI PENEMPATAN MULTI *FACTS DEVICE*  
MENGUNAKAN METODE *BREEDER GENETIC ALGORITHM (BGA)*  
UNTUK MEREDUKSI RUGI – RUGI DAYA  
PADA SALURAN TRANSMISI 150 kV UPT. MALANG**

**SKRIPSI**

*Disusun dan Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik Energi Listrik Strata Satu (S-1)*

**Disusun Oleh :**

**Fauzi Hamzah Nasution**

**NIM : 05 . 12 . 021**

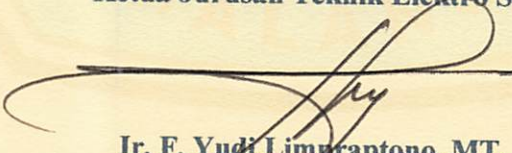
**Diperiksa dan Disetujui,**

**Dosen Pembimbing Skripsi**

  
**Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT.**  
**NIP. Y. 1018800189**

**Mengetahui,**

**Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1**

  
**Ir. F. Yudi Limpraptono, MT.**  
**NIP. Y. 103.9500.274**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
2010**

# ABSTRAK

## OPTIMASI PENEMPATAN MULTI *FACTS DEVICE* MENGUNAKAN METODE *BREEDER GENETIC* *ALGORITHM* UNTUK MEREDUKSI RUGI – RUGI DAYA PADA SALURAN TRANSMISI 150Kv UPT. MALANG

( Fauzi Hamzah Nasution, Nim 05. 12. 021, Teknik Elektro/Teknik Energi Listrik S-1 )  
( Dosen Pembimbing : Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT )

Perkembangan di bidang elektronika daya yang sangat cepat memungkinkan penggunaan *Flexible AC Transmission System (FACTS) devices* yang sangat luas dalam sistem tenaga. *FACTS* dapat di gunakan untuk meningkatkan aliran daya, stabilitas sistem dan mengurangi rugi-rugi pada saluran transmisi. Aliran daya yang optimal dapat dicapai dengan penentuan lokasi *FACTS devices* yang tepat dan rating yang sesuai.

pada skripsi ini Algoritma Genetika di gunakan untuk simultan bagaimana penempatan *FACTS device* yang optimal maka dilakukan pada 3 parameter yaitu lokasi, tipe dan rating. Jenis *FACTS devices* yang di gunakan *TCSC* dan *SVC*. Hasil Optimasi pada sistem transmisi 150kV UPT.Malang dengan menggunakan *software MATLAB versi 6.5*.

Didapatkan bahwa dengan memasang *multi FACTS device* pada saluran 150 kV UPT. Malang lebih baik dibandingkan dengan pemasangan secara *singel type TCSC* dan *singel type SVC*. Dimana dengan pemasangan *multi FACTS, TCSC* pada saluran 5 (PIER-Pakis) dan *SVC* pada Bus 7 ( KB.Agung ) mampu mereduksi rugi – rugi saluran sebesar 1,773 MW, dari 3,946 MW menjadi 2,173 MW atau mereduksi sebesar 44,935 %. Sedangkan untuk pemasangan *singel type TCSC* pada saluran 5 (PIER – PAKIS) dapat mereduksi rugi – rugi sistem saluran sebesar 1,585 MW, dari 3,946 MW menjadi 2,361 MW atau mereduksi sebesar 40,174 % dan dengan pemasangan *SVC* pada bus 6 hanya dapat mereduksi rugi – rugi sistem saluran sebesar 0,167 MW, dari 3,946 MW menjadi 3,779 atau mereduksi sistem saluran sebesar 4.248 %.

Kata Kunci : Peralatan *Facts*, Algoritma Genetika, *TCSC, SVC*.





## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan taufik-Nya kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul “ OPTIMASI PENEMPATAN MULTI *FACTS DEVICE* MENGGUNAKAN METODE *BREEDER GENETIC ALGORITHM* UNTUK MEREDUKSI RUGI – RUGI DAYA PADA SALURAN TRANSMISI 150Kv UPT. MALANG ”.

Selama penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan bantuan, bimbingan, dan kerjasama dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Abraham Lomi, MSEE selaku Rektor ITN Malang.
2. Bapak Ir. F. Yudi Limpraptono, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITN
3. Bapak Ir. Yusuf Ismail Nakhoda, MT selaku Dosen Pembimbing.
4. Papa, Mama, Abang, Kakak dan seluruh keluarga besar Nasution yang selalu memberikan semangat, dorongan, doa, cinta dan segalanya.
5. Sahabat-sahabat setia seperjuangan skripsi (mas rizal, deni, kristian, jack)
6. Bapak jayeng dan bapak sugeng yang telah membantu dispensasinya
7. Rekan-rekan mahasiswa jurusan Enersi Listrik Angkatan 2005 atas segala dorongannya.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan skripsi ini tidak terlepas dari kekurangan, sehingga kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak sangat penulis harapkan.

Malang, Maret 2010

Penulis

## **DAFTAR ISI**

<b>LEMBAR PERSETUJUAN.....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAKSI .....</b>	<b>ii</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR GRAFIK.....</b>	<b>xii</b>
<b>BABI PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan .....	3
1.4. Batasan Masalah .....	4
1.5. Metodologi Pemecahan Masalah .....	4
1.6. Sistematika Penulisan .....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>6</b>
2.1. Sistem Tenaga Listrik .....	6
2.2. Saluran Transmisi Tenaga Listrik .....	6
2.3. Daya Dalam Sistem Tenaga .....	8
2.3.1. Daya Aktif .....	8
2.3.2. Daya Reaktif .....	9
2.3.3. Daya Semu .....	9

2.4. Faktor Daya .....	10
2.5 Pengaruh Daya Reaktif Terhadap Tegangan .....	11
2.6. Kapasitor Shunt.....	13
2.6.1. Pengurangan Rugi-rugi dengan Kapasitas shunt .....	14
2.6.2. Perbaikan Tagangan dengan Kapasitas shunt .....	14
2.6.3. Perbaikan Faktor Daya dan Kenaikkan Kapasitas .....	15
2.7 Kompensasi Reaktif Saluran Transmisi .....	19
2.8 Peralatan Elektronika Daya .....	22
2.8.1. Transistor Bipolar .....	22
2.8.2. Metal Oxide Semikonduktor FET (MOSFET) .....	23
2.8.3. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) .....	24
2.8.4. Perbandinga Umum Antara Kinerja MOSFET dan IGBT .....	24
2.9 Peralatan Kompensasi Dalam Sistem Tenaga Listrik .....	29
2.9.1. Static VAR Compensator (SVC) .....	29
2.9.2. NGH – Sub Synchronous Resonance (SSR) .....	30
2.9.3. Thyristor Controller Series Capacitor (TCSC) .....	30
2.9.4. Static Condenser (STATCON) .....	32
2.9.5. Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPR) .....	33
2.10 Metode Newton Raphson .....	34
2.10.1 Algoritma Aliran daya Newton Raphson .....	37
2.10.2 Flowchart Algoritma Aliran Daya Newton Raphson .....	38
2.11 Metode Algoritma Genetika .....	39
2.11.1 Istilah – istilah Algoritma Genetika .....	40



2.11.2	Komponen – komponen Utama Pada Algoritma Genetika .....	43
2.11.2.1	Teknik Penyandian .....	43
2.11.2.2	Prosedur Inisialisasi .....	44
2.11.2.3	Fungsi Evaluasi .....	44
2.11.2.4	Seleksi .....	45
2.11.2.5	Operatoe Genetika .....	47
2.12	Peralatan FACTS devices Yang Digunakan .....	50
2.12.1	Pemilihan FACTS devices .....	50
2.12.2	Model Matematika FACTS devices .....	51
2.12.2.1	TCSC (Thyristor Controller Series Capacitor) .....	51
2.12.2.2	Static VAR Kompesator (SVC) .....	53
<b>BAB III PERBAIKAN RUGI – RUGI DENGAN MULTI FACTS</b>		
<b>DEVICE UNTUK MEREDUKSI RUGI – RUGI DAYA</b>		
<b>DALAM SISTEM .....</b>		
		<b>60</b>
3.1.	<i>Software Matlab</i> versi 6.5 .....	60
3.2.	Memulai <i>Software Matlab</i> .....	60
3.3.	Data Lapangan PT. PLN (persero) UPT Malang .....	64
3.3.1.	Data Bus Transmisi 150kV.....	64
3.3.2.	Data Tegangan dan Pembebanan Bus .....	65
3.4.	Data Saluran Transmisi .....	69
3.5.	Flowchart Breeder Genetic Algorithm .....	72
3.6.	<i>Flowchart</i> Optimasi Penentuan FACTS .....	73

<b>BAB IV SIMULASI DAN ANALISA</b> .....	<b>74</b>
4.1. Single Line Transmisi 150kV UPT Malang .....	74
4.2. Gambar Single Line Diagram .....	75
4.3. Analisa Hasil .....	77
4.3.1 Hasil Analisa Aliran Daya Sebelum di Inject .....	77
4.4. Hasil Analisa Optimasi menggunakan FACTS DEVICE (TCSC) .....	78
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	<b>84</b>
5.1. Kesimpulan .....	84
5.2. Saran .....	84
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	<b>85</b>
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Rangkaian Setara Saluran Transmisi Pendek .....	7
Gambar 2.2	Segitiga Daya .....	11
Gambar 2.3	Aliran Daya Melalui Saluran Pendek .....	11
Gambar 2.4	Perubahan Tegangan Sebagai Fungsi Aliran Daya .....	12
Gambar 2.5	Saluran Primer Dengan Beban Terpusat .....	14
Gambar 2.6	Vektor Diagram .....	15
Gambar 2.7	Perbaikan Faktor Daya .....	17
Gambar 2.8	Rangkaian Ekuivalen Dari Saluran .....	21
Gambar 2.9	Rangkaian Ekuivalen Dari Saluran .....	21
Gambar 2.10	Tegangan Drop Kondisi Menyambung Untuk Sebuah MOSFET dan IGBT.....	28
Gambar 2.11	<i>Static VAR Compensator</i> .....	29
Gambar 2.12	NGH – <i>Sub Synchronous Resoance</i> .....	30
Gambar 2.13	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)</i> .....	31
Gambar 2.14	<i>Static Condenser (STATCON)</i> .....	33
Gambar 2.15	<i>Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPR)</i> .....	34
Gambar 2.16	<i>Flowchart</i> Algoritma Aliran Daya Newton Rapshon .....	38
Gambar 2.17	Representasi String Bit .....	43
Gambar 2.18	<i>Roulette Wheel Selection</i> .....	46
Gambar 2.19	Kedaaan Sebelum Ranging .....	47
Gambar 2.20	Kedaaan Scsudah Ranking .....	47

Gambar 2.21	Ilustrasi Operator Dengan One Point Crossover .....	48
Gambar 2.22	Ilustrasi Operator Dengan Two Point Crossover .....	48
Gambar 2.23	Ilustrasi Operator Dengan Uniform Crossover .....	49
Gambar 2.24	Reaktansi Ekuivalen .....	51
Gambar 2.25	Model TCSC .....	52
Gambar 2.26	Static VAR Compensator .....	54
Gambar 2.27	Konfigurasi SVC .....	56
Gambar 2.28	Keadaan Steady State Karakteristik V-I .....	58
Gambar 2.29	Line Diagram Static Var Compensator .....	59
Gambar 3.1	Tampilan Utama <i>Software Matlab versi 6.5</i> .....	61
Gambar 3.2	Tampilan <i>Editor M-File</i> .....	62
Gambar 3.3	Tampilan Editor Simulink dan Library .....	63
Gambar 3.4	Breeder Genetic Algorithm .....	72
Gambar 3.5	Strategi Optimasi .....	73
Gambar 4.1	Singel Line Saluran Tranmisi 150kV UPT Malang .....	75
Gambar 4.2	Hasil Load Flow dengan Software Matlab .....	76
Gambar 4.3	Hasil Optimasi Dengan 3 Buah TCSC .....	79
Gambar 4.4	Hasil Optimasi Dengan 3 Buah SVC .....	81
Gambar 4.5	Hasil Optimasi Dengan TCSC dan SVC .....	83

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbandingan Tiga Piranti Penyalur Daya Untuk Kemampuan Yang Setara.....	24
Tabel 2.2	Perbandingan Karakteristik Piranti Penyalur Daya.....	26
Tabel 2.3	Perbandingan Tegangan Drop dan Rating Tegangan antara IGBT dan MOSFET .....	27
Tabel 2.4	Istilah yang digunakan dalam Algoritma Genetika .....	41
Tabel 3.1	Data Tegangan Bus Gardu Induk pada Bulan Juni 2007 .....	66
Tabel 3.2	Data Pembebanan Bus Gardu Induk pada tanggal 14 Juni 2007.....	68
Tabel 3.3	Data Penghantar terpasang pada saluran transmisi 150kV.....	69
Tabel 3.4	Data Impedansi Penghantar pada transmisi 150 kV .....	70
Tabel 4.1	Hasil Load Flow sebelum optimasi .....	77
Tabel 4.2	Hasil Load Flow Menggunakan 3 Buah TCSC .....	78
Tabel 4.3	Hasil Load Flow Menggunakan 3 Buah SVC .....	80
Tabel 4.4	Hasil Load Flow Menggunakan TCSC dan SVC .....	82

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Saluran transmisi merupakan bagian yang sangat penting untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit. Jaringan yang luas menyebabkan pengoperasian sistem tenaga menjadi lebih rumit. *Congestion* dapat terjadi pada *line* transmisi akibat peningkatan transfer daya pada line transmisi untuk memenuhi pertumbuhan beban dan interkoneksi antar jaringan yang melibatkan ribuan bus dan ratusan generator. Untuk menjamin keamanan operasi sistem, pada umumnya sistem transmisi tegangan tinggi beroperasi jauh dibawah rating termalnya akibat adanya batas tegangan dan batas kestabilan.

Perkembangan *power electronics*, perhatian terhadap lingkungan, serta semakin meningkatnya biaya yang diperlukan untuk membangun saluran transmisi dan pusat pembangkit yang baru merupakan alasan penggunaan *FACTS devices*. Disisi yang lain rugi - rugi daya dari sistem yang telah ada dapat direduksi, sehingga sistem menjadi lebih fleksibel terhadap pembangkitan dan beban yang bervariasi. Parameter saluran transmisi seperti impedansi, tegangan terminal, dan sudut tegangan dapat dikontrol secara cepat dan efektif dengan menggunakan *FACTS devices*.

Semenjak diperkenalkan oleh Hingorani pada tahun 1988, berbagai riset telah dilakukan berkaitan dengan *FACTS devices* dengan tinjauan yang berbeda,



misalnya riset tentang load flow akibat penambahan *FACTS devices* pada line transmisi, *optimal power flow*, tinjauan stabilitas dan tinjauan ekonomis.

TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*), dan SVC (*Static Var Compensator*). Merupakan salah satu peralatan *FACTS* yang mampu mengatur aliran daya dan meningkatkan kestabilan transient sistem daya. TCSC dapat berfungsi sebagai reaktansi kapasitif maupun reaktansi induktif untuk mengubah reaktansi line transmisi. Untuk mencegah terjadinya resonansi, sedangkan SVC mengatur regulasi tegangan terminal dengan cara membangkitkan atau menyerap daya reaktif dari sistem. Jika tegangan sistem lebih rendah, SVC membangkitkan daya reaktif (kapasitif). Jika tegangan sistem lebih tinggi, SVC menyerap daya reaktif (induktif). dalam hal ini metode *Breeder Algoritma Genetika (BGA)* digunakan untuk mencari lokasi optimum dari *FACTS devices* pada sistem kelistrikan saluran transmisi 150 kV UPT. Malang dengan didukung *software* MATLAB.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Saluran transmisi merupakan bagian yang sangat penting untuk menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit. Jaringan yang luas menyebabkan pengoperasian sistem tenaga menjadi lebih rumit. Dalam penyaluran suatu energi listrik pada saluran transmisi banyak rugi – rugi yang terdapat dalam pentransferan suatu daya energi listrik.

Masalah penyaluran daya energi listrik merupakan salah satu masalah dalam kualitas daya. Bagaimana solusi meminimalisasi rugi – rugi daya dalam suatu transmisi ?

Dari permasalahan di atas maka makalah ini berjudul:

**“ OPTIMASI PENEMPATAN MULTI *FACTS DEVICE*  
MENGUNAKAN METODE *BREEDER GENETIC ALGORITHM (BGA)*  
UNTUK MEREDUKSI RUGI – RUGI DAYA  
PADA SALURAN TRANSMISI 150 kV UPT. MALANG ”**

## **1.3. Tujuan**

Berdasarkan permasalahan yang dikemukakan di atas, maka skripsi ini bertujuan untuk mereduksi rugi – rugi daya sistem tenaga listrik dengan menempatkan multi *FACTS device* (TCSC dan SVC) menggunakan metode Breeder Genetic Algorithm ( BGA ).

#### **1.4. Batasan Masalah**

1. Jaringan yang dianalisa adalah pada saluran transmisi 150 kV UPT Malang.
2. Metode aliran daya yang digunakan yaitu metode *Newton Rhapson*.
3. Multi *FACTS* ( TCSC dan SVC ) yang digunakan untuk mereduksi rugi – rugi daya.
4. Perhitungan dan simulasi dilakukan dengan menggunakan *Software MATLAB*.
5. Tidak membahas masalah harmonisa.
6. Tidak membahas masalah proteksi.

#### **1.5. Metodologi Pemecahan Masalah**

1. Studi literatur berupa pengumpulan dan pembahasan referensi yang berkaitan dengan pokok pembahasan masalah ini, sehingga membantu dalam memahami dasar-dasar dari peralatan yang digunakan dalam sistem dan membantu dalam memahami prinsip dan karakteristik setiap parameter elektronika daya yang digunakan.
2. Pengumpulan data lapangan sebagai objek penelitian.
3. Melakukan analisis berdasarkan hasil simulasi program MATLAB.
  - a. Analisis aliran daya aktif dan reaktif.

4. Mengambil kesimpulan dari perbandingan sistem yang menggunakan alat kompensasi multi *FACTS* ( TCSC dan SVC ) dan tanpa menggunakan kompensasi multi *FACTS* ( TCSC dan SVC ).

#### **1.6. Sistematika Penulisan**

Penulisan dibagi dalam beberapa bab dan sub bab, adapun sistematika penulisan skripsi ini adalah:

##### **BAB I : PENDAHULUAN**

Berisi penguraian tentang Latar Belakang, Rumusan Masalah, Tujuan Penelitian, Batasan Masalah, Metodologi Penelitian dan Sistematika Penulisan

##### **BAB II : TINJAUAN PUSTAKA**

Berisi tentang penjelasan teori singkat Sistem transmisi tenaga listrik secara umum, teori konsep daya arus bolak-balik, teori hantaran system hantaran daya listrik, kompensasi dengan kapasitor shunt, metode *Newtown Rhapson* sekilas

##### **BAB III : PERBAIKAN RUGI – RUGI DAYA DENGAN MULTI FACTS DEVICE**

Berisi penguraian tentang pengenalan software, data lapangan, strategi pemecahan masalah

##### **BAB IV : SIMULASI DAN ANALISA**

Menguraikan tentang hasil simulasi dan menganalisa hasil simulasi

##### **BAB V : PENUTUP**

Berisi kesimpulan dan saran berdasarkan hasil simulasi.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Sistem Tenaga Listrik<sup>[1]</sup>**

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terpadu yang terbentuk oleh hubungan-hubungan peralatan dan komponen komponen listrik. Sistem tenaga listrik ini mempunyai peranan utama untuk menyalurkan energi listrik yang dibangkitkan oleh generator ke konsumen yang membutuhkan energi listrik tersebut.

Secara garis besar suatu sistem tenaga listrik dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian sub sistem yaitu :

1. Sistem pembangkitan : berperan sebagai sumber daya tenaga listrik dan disebut juga sebagai prodaktor energi.
2. Sistem transmisi atau penyalur : berfungsi sebagai penyalur daya listrik dalam skala besar dari pembangkit ke bagian sistem distribusi.
3. Sistem distribusi dan beban : berfungsi sebagai distributor energi ke konsumen yang memerlukan energi tersebut.

#### **2.2 Saluran Transmisi Tenaga Listrik ( STTL )<sup>[2]</sup>.**

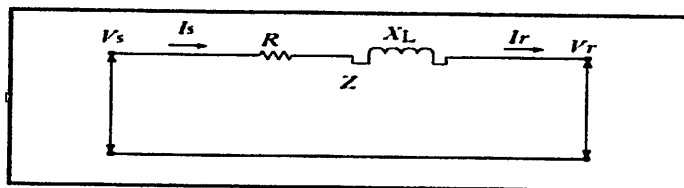
Saluran transmisi direpresentasikan sesuai dengan kelas transmisi.

Representasi saluran transmisi berdasarkan jarak terbagi atas 3 kelas yaitu :

1. Transmisi pendek ( $l < 80$  km/50 mil).

2. Transmisi menengah ( $80 \text{ km}/50 \text{ mil} < l < 240 \text{ km}/150 \text{ mil}$ ).
3. Transmisi panjang ( $>240 \text{ km} / 150 \text{ mil}$ ).

Sebenarnya klasifikasi tersebut sangat kabur dan sangat relatif. Klasifikasi STTL harus didasarkan pula atas besar-kecilnya kapasitansi antar fasa atau kapasitansi fasa ke tanah. Dalam hal ini pembagian kelas saluran transmisi berhubungan dengan besarnya kapasitansi saluran ke tanah. Kapasitansi ke tanah merupakan fungsi jarak dari saluran transmisi. Untuk saluran transmisi pendek maka besarnya kapasitansi ke tanah dapat diabaikan. Untuk saluran menengah besarnya harga kapasitansi tidak diabaikan, namun belum terlalu besar sehingga kapasitansi ke tanah dapat dianggap terpusat (*lumped capacitance*). Untuk transmisi panjang maka besarnya harga kapasitansi tidak dapat dianggap terpusat melainkan terbagi merata disepanjang saluran. Pada saluran transmisi pendek kapasitansi saluran diabaikan sehingga rangkaian pengganti saluran hanya terdiri dari R dan XL.



Gambar 2.1  
Rangkaian Setara Saluran Transmisi Pendek

Dimana:  $V_s$  = tegangan pada ujung kirim atau ujung generator.

$I_s$  = arus pada ujung kirim atau ujung generator

$V_r$  = tegangan pada ujung terima atau ujung beban

$I_r$  = arus pada ujung terima atau ujung beban



$Z$  = impedansi saluran

Hubungan antara tegangan dan arus sebagai berikut:

$$V_s = V_r + ZI_r \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$I_r = I_s \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Ada juga klasifikasi berdasarkan tegangan kerja. Makin tinggi tegangan kerja, kemungkinan timbulnya korona juga makin besar. Korona ini akan memperbesar kapasitansi sehingga akan memperbesar arus bocornya pula. Pada transmisi tegangan rendah berkapasitas arus tinggi, akan terjadi jatuh tegangan di jaringan transmisi yang disebabkan oleh rugi-rugi jaringan transmisi. Namun pada transmisi tegangan tinggi dan ekstra tinggi (kapasitas arus rendah) kondisi yang berbeda terjadi. Pada transmisi tegangan tinggi, kejatuhan tegangan akan sedikit terkompensasi karena pembangkitan daya reaktif yang disebabkan efek kapasitansi kabel transmisi. Tetapi pada transmisi tegangan ekstra tinggi, efek kapasitansi kabel transmisi lebih dominan terhadap rugi-rugi kabel transmisi yang menyebabkan tegangan akan selalu naik pada sisi penerima.

### 2.3. Daya Dalam Sistem Tenaga<sup>[2]</sup>

#### 2.3.1 Daya Aktif (*Active Power*)

Daya aktif adalah daya nyata yang dihasilkan suatu jaringan sistem tenaga listrik, Secara umum daya nyata dinyatakan dalam persamaan :

$$P = |V| |I| \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Daya aktif untuk beban 3 fasa seimbang

$$P = \sqrt{3} |V_{j\text{-}j\text{-}j}| |I_{j\text{-}j\text{-}j}| \cos \theta \dots\dots\dots(2.4)$$

**2.3.2 Daya Reaktif (*Reactive Power*)**

Daya reaktif adalah daya yang timbul karena adanya pembentukan medan magnet pada beban-beban induktif dalam satuan VAR atau Kvar(Kilo Volt Ampere Reaktif). Daya reaktif dinyatakan dalam persamaan :

$$Q = |V| |I| \sin \theta \dots\dots\dots(2.5)$$

Daya reaktif untuk beban 3 fasa seimbang :

$$Q = \sqrt{3} |V_{j\text{-}j\text{-}j}| |I_{j\text{-}j\text{-}j}| \sin \theta \dots\dots\dots(2.6)$$

Daya reaktif ada dua jenis yaitu daya reaktif induktif dan daya reaktif kapasitif yang keduanya memiliki tanda berlawanan.

**2.3.3 Daya Semu (*Apparent Power*)**

Daya semu merupakan penjumlahan secara vektoris antara daya aktif dan daya reaktif yang memiliki satuan (KVA). Selain ketiga daya diatas ada yang dinamakan faktor daya atau *power factor* adalah perbandingan antara daya aktif dan daya semu. Sedangkan hubungan antara ketiga daya dengan faktor daya disebut segitiga daya. Adapun Daya semu dinyatakan dalam persamaan :

$$S = |V| |I| \dots\dots\dots(2.7)$$

Daya semu untuk beban 3 fasa seimbang :

$$S = \sqrt{3} |V| |I| \dots\dots\dots(2.8)$$

## 2.4 Faktor Daya

Pada sebagian besar peralatan mengandung dua unsur / jenis beban yaitu beban resistif dan beban reaktif. Dalam hal ini maka akan membutuhkan pula komponen arus yang disebut arus  $I_r$  (arus beban resistif) dan arus  $I_x$  (arus beban reaktif), kedua komponen arus tersebut adalah :

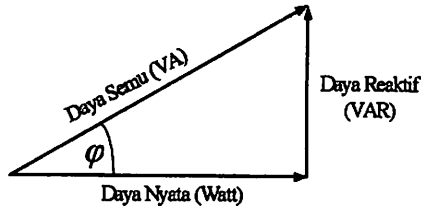
1. Arus beban resistif adalah arus yang dikonversikan menjadi kerja, biasanya dalam bentuk panas, kerja mekanik, cahaya dan bentuk energi lain. Daya yang dihasilkan dari adanya arus ini adalah daya kerja dengan satuan Watt.
2. Arus beban reaktif mengalir pada komponen beban yang tidak dapat dikonversikan menjadi bentuk penggunaan energi lain secara langsung, tetapi keberadaannya tidak dapat dipisahkan dari kebutuhan beban antara lain untuk menghasilkan fluks dalam pengoperasian peralatan elektromagnetis (misalnya : trafo, motor induksi, dsb). Tanpa arus ini maka tidak ada arus magnetisasi dan energi tidak mengalir melalui trafo atau menembus celah udara pada motor induksi.

Faktor daya adalah perbandingan antara daya nyata dan daya semu.

$$\text{Faktor Daya} = \frac{\text{Daya Nyata (kW)}}{\text{Daya Semu (kVA)}} \dots\dots\dots(2.9)$$

Untuk daya semu sendiri dibentuk oleh dua komponen daya nyata (kW) dan daya reaktif (kVar).

Hubungan ini dapat digambarkan sebagai berikut:



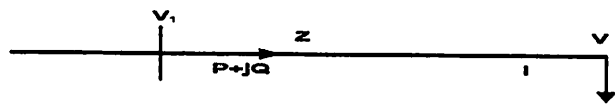
Gambar 2.2  
Segitiga Daya

Dengan faktor daya =  $\frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$  .....(2.10)

### 2.5 Pengaruh Daya reaktif terhadap tegangan

Keseimbangan daya reaktif yang dihasilkan dan digunakan harus dapat dipertahankan agar tidak terjadi perubahan tegangan. Bila besaran tegangan ini mengalami perubahan, maka daya reaktif pada simpul tersebut tidak dapat dipertahankan lagi. Ini perlu aliran daya reaktif pada sistem.

Dari gambar dibawah ini terlihat bahwa pembangkit memberikan daya sebesar  $P + jQ$  ke beban. Misalkan  $R$  dianggap jauh lebih kecil dari  $X$ , maka resistansi saluran dapat diabaikan. Sehingga impedansi saluran dituliskan  $Z = jX$ .



Gambar 2.3  
Aliran Daya Melalui Saluran Pendek

Jatuh tegangan yang terjadi sepanjang saluran disebabkan oleh adanya impedansi.

sehingga hubungan yang terjadi :

$V_2 = V_1 - I.Z$  .....(2.11)

Karena daya yang mengalir pada simpul I adalah  $P + jQ$ , maka :

$$I = \frac{P + jQ}{V_1^*} \dots\dots\dots(2.12)$$

Jika  $V_1$  dipilih sebagai referensi maka dapat dianggap mempunyai sudut nol maka persamaan menjadi :

$$I = \frac{P - jQ}{V_1} \dots\dots\dots(2.13)$$

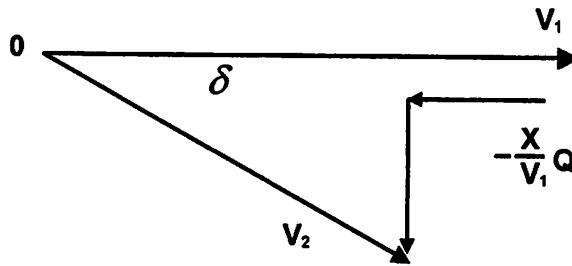
Substitusi persamaan (11) ke persamaan (9) diperoleh :

$$V_2 = V_1 - \left(\frac{P - jQ}{V_1}\right) \cdot Z \dots\dots\dots(2.14)$$

$$V_2 = V_1 - \left(\frac{jXP}{V_1} + \frac{XQ}{V_1}\right) \dots\dots\dots(2.15)$$

$$V_2 = V_1 - \frac{X}{V_1}Q - j\frac{X}{V_1}P \dots\dots\dots(2.16)$$

Persamaan diatas dapat dilihat dalam bentuk gambar sebagai berikut :



Gambar 2.4  
Perubahan Tegangan Sebagai Fungsi Aliran Daya Reaktif

Dari persamaan diatas dapat dijelaskan :

1. Perubahan daya aktif  $\Delta P$  pada dasarnya hanya mempengaruhi sudut fasa tegangan sedangkan magnitude tegangan hampir tidak berubah.

2. Perubahan daya reaktif  $\Delta Q$  pada dasarnya hanya mempengaruhi magnitudo tegangan [V] dan hampir tidak berpengaruh pada sudut fasa tegangan.

## 2.6 Kapasitor Shunt

Kapasitor shunt adalah kapasitor yang dihubungkan parallel dengan saluran dan secara intensif digunakan pada system jaringan. Kapasitor shunt mencatu daya reaktif atau arus yang menentang komponen arus beban induktif. Dengan dipasang kapasitor shunt pada jaringan akan dapat memperbaiki profil tegangan, memperbaiki factor daya, dan menaikkan kapasitas system serta dapat mengurangi rugi – rugi saluran.

Ada dua cara dalam pemakaian kapasitor shunt

- Kapasitor tetap ( *stay Capacitance* )

Adalah kapasitor untuk kompensasi daya reaktif yang kapasitansinya tetap dan selalu terpasang di jaringan. Penggunaan kapasitor jenis ini harus memperhatikan kenaikan tegangan yang terjadi pada saat beban ringan agar tidak melebihi batas tegangan yang di tetapkan.

- Kapasitor saklar ( *Tapping Capacitance* )

Adalah kapasitor untuk kompensasi daya reaktif yang dapat di hubungkan dan dilepaskan dari jaringan dan dapat diatur besar kapasitasnya sesuai dengan kondisi beban.

Proses membuka – menutup dari sakelar kapasitor shunt dapat dilakukan dengan cara manual maupun dengan cara otomatis. Pengendalian secara



2. Perubahan daya reaktif  $\Delta Q$  pada dasarnya hanya mempengaruhi magnitudo tegangan [V] dan hampir tidak berpengaruh pada sudut fasa tegangan.

### 2.6 Kapasitor Shunt

Kapasitor shunt adalah kapasitor yang dihubungkan paralel dengan saluran dan secara intensif digunakan pada sistem tenaga. Kapasitor shunt mencari daya reaktif alam arus yang menentang komponen arus beban induktif. Dengan dipasang kapasitor shunt pada jaringan akan dapat memperbaiki profil tegangan, memperbaiki faktor daya, dan menaikkan kapasitas sistem serta dapat mengurangi rugi-rugi saluran.

Ada dua cara dalam pemakaian kapasitor shunt

- Kapasitor tetap (fixed capacitor)

Adalah kapasitor untuk kompensasi daya reaktif yang kapasitasnya tetap dan selalu terpasang di jaringan. Penggunaan kapasitor jenis ini harus memperhatikan kenaikan tegangan yang terjadi pada saat beban ringan agar tidak melebihi batas tegangan yang di tetapkan.

- Kapasitor saklar (switch capacitor)

Adalah kapasitor untuk kompensasi daya reaktif yang dapat di hubungkan dan dilepaskan dari jaringan dan dapat dalam besar kapasitasnya sesuai dengan kondisi beban.

Proses membuka -- menutup dari saklar kapasitor shunt dapat dilakukan dengan cara manual maupun dengan cara otomatis. Pengendalian secara

manual ( pada lokasi atau kendali jarak jauh ) dapat dilakukan pada GI. Untuk pengendalian secara otomatis, termasuk didalamnya peralatan pengendali tegangan, arus, tegangan , waktu dan suhu. Tipe yang paling populer adalah pengendali saklar waktu ( *time-switch control* ), pengendali tegangan dan pengendali tegangan-arus.

### 2.6.1 Pengurangan Rugi – Rugi Dengan Kapasitor Shunt

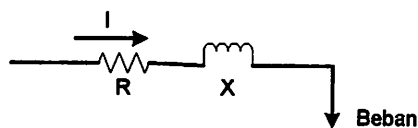
Rugi – rugi saluran per fasa dari saluran 3 fasa seimbang dengan beban terpusat seperti pada gambar 2-5 adalah  $I^2(R - jX)$  atau dapat dibedakan menjadi:

$$\text{Rugi daya aktif ( } I^2R \text{)} = ( I^2_R + I^2_X ) R \dots\dots\dots(2.17)$$

$$\text{Rugi daya reaktif ( } I^2X \text{)} = ( I^2_R + I^2_X ) X \dots\dots\dots(2.18)$$

Dimana :  $I_R$  adalah komponen arus aktif

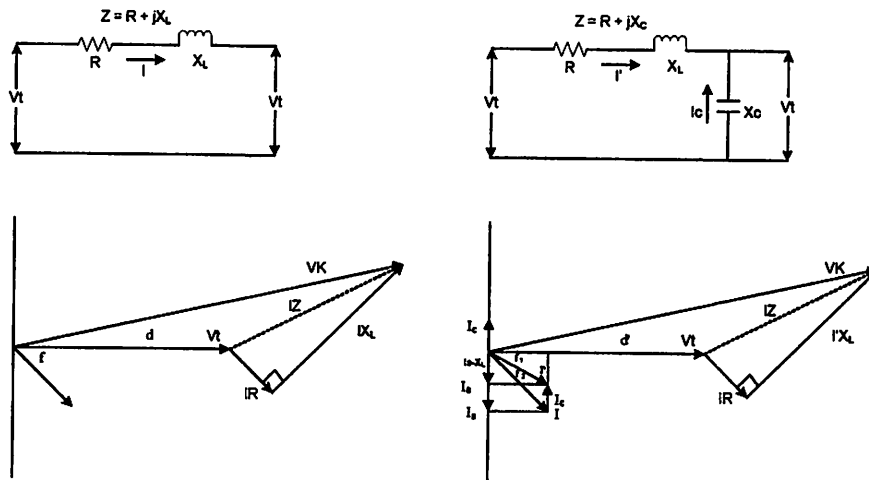
$I_X$  adalah komponen arus reaktif



Gambar 2-5  
Saluran Primer Dengan Beban Terpusat

### 2.6.2 Perbaikan Tegangan Dengan Kapasitor Shunt

Pemakaian kapasitor shunt dalam system tenaga listrik selain untuk memperbaiki factor daya, juga bertujuan menaikkan tegangan. Dan secara vector dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 2.6

Vektor Diagram (a) sebelum dipasang kapasitor; (b) sesudah dipasang kapasitor Dalam perbaikan factor daya untuk kenaikan profil tegangan pada system tenaga listrik di indonesia, mengacu pada ketentuan dari PT. PLN (PERSERO). Batas ambang atas tegangan untuk system transmisi 150 kV adalah 5%, yaitu 157,5 kV. Sedangkan batas ambang bawah tegangan untuk system transmisi 150 kV adalah 10%, yaitu 135 kV.<sup>[9]</sup>

### 2.6.3 Perbaikan Faktor Daya dan Kenaikan Kapasitas

Biasanya untuk memperbaiki factor daya digunakan beberapa peralatan seperti :

#### ➤ Generator Sinkron

Untuk membangkitkan daya reaktif adalah dengan mengatur arus penguatannya. Pengiriman daya reaktif ke jala-jala adalah dengan mengatur pada keadaan penguatan lebih. Generator sebagai sumber daya reaktif akan lebih ekonomis ( bekerja optimal ) bila bekerja pada efisiensi tertinggi, yaitu

bila generator mengirimkan daya aktif sebesar harga nominalnya, jadi kebutuhan daya reaktif (KVAR) sebaiknya dipenuhi sumber lain.

➤ **Kondesator sinkron**

Adalah suatu mesin sinkron dengan penguatan DC pada kumparan medan rotornya dan bekerja sebagai motor beban nol. Bila penguatan mesin tersebut “*under excited*” maka mesin tersebut memerlukan daya reaktif ke jala-jala dan jika penguatannya “*over excited*” maka mesin tersebut akan mengirimkan daya reaktif ke jala-jala. Kondesator sinkron tidak memerlukan daya aktif, daya aktif diperlukan hanya untuk mengatasi rugi-rugi beban nol saja yang besarnya antara 1% sampai dengan 4,5% dari rating MVA-nya. Kondesator sinkron digunakan untuk memenuhi daya reaktif yang relative besar ( antara 5 sampai dengan 10 MVAR ) pada jala-jala.

➤ **Kapasitor shunt**

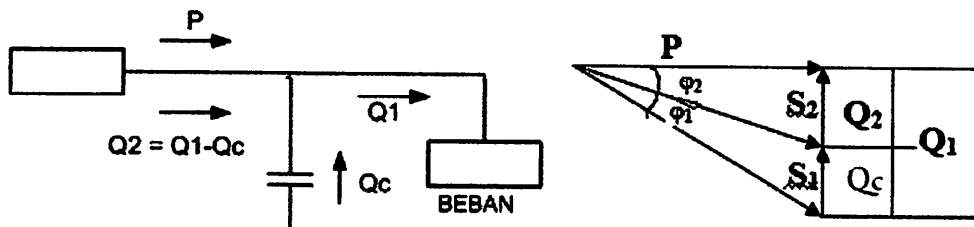
Merupakan komponen pembangkit daya reaktif yang dihubungkan parallel dan secara intensif digunakan pada system jaringan. Kapasitor shunt mencatu daya reaktif atau arus yang memotong komponen arus beban induktif . kapasitor shunt terdiri dari unit-unit standar mulai dari 15kVAR sampai dengan 25MVAR. Dengan dipasang kapasitor shunt pada jaringan akan memperbaiki profil tegangan, memperbaiki factor daya dan mengurangi rugi-rugi saluran.

➤ **Kapasitor seri**

Merupakan kapasitor yang terpasang seri pada jaringan. Prinsip utamanya adalah mengurangi reaktansi ekuivalen saluran ( $X_{sal}$ ) dengan memasukkan

reaktansi kapasitif kapasitor ( mengkompensasi reaktansi induktif ) secara seri pada system transmisi tenaga listrik.

Manfaat terbesar yang diperoleh dari perbaikan faktor daya adalah pengurangan daya reaktif dalam system. Hal ini menghasilkan pengurangan biaya, pemakaian daya yang lebih rendah, kenaikan kapasitas system, perbaikan tegangan, dan pengurangan *losses* dalam system. Satu-satunya jalan untuk memperbaiki faktor daya adalah mengurangi daya reaktif jaringan. Jika komponen reaktif dapat dikurangi, maka total arus akan berkurang, sedangkan komponen daya aktif tidak berubah maka faktor daya akan lebih besar sebagai akibat dari berkurangnya daya reaktif. Faktor daya akan mencapai 100% jika komponen daya reaktif sama dengan nol ( 0 ). Dengan menambahkan kapasitor, daya reaktif Q akan berkurang. Gambar 2.7 menunjukkan perbaikan factor daya pada system, kapasitor mensuplai daya reaktif ke beban.



Gambar 2.7  
Perbaikan faktor daya

Diasumsikan bahwa beban disuplai oleh daya nyata P, daya reaktif Q dan daya semu S, pada faktor daya tertinggal (lagging)  $\cos \phi_1$

$$\cos \phi_1 = \frac{P}{S_1} \dots\dots\dots(2.19)$$

Jika suatu kapasitor dipasang  $Q_C$  VAR dipasang pada sisi beban, faktor daya

dapat diperbaiki dari  $\cos\phi_1$  menjadi  $\cos\phi_2$ , dimana

$$\begin{aligned} \cos\phi_1 &= \frac{P}{S_1} \\ &= \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \\ &= \frac{P}{\sqrt{P^2 + (Q_1 - Q_C)^2}} \dots\dots\dots(2.20) \end{aligned}$$

Sehingga daya semu ( $S_1$ ) dan daya reaktif berkurang dari  $S_1$  (VA) ke  $S_2$ (VA) dan  $Q_1$  (VAR) ke  $Q_2$  sehingga kapasitas beban akan meningkat.

Cara menentukan besaran nilai kapasitor pada suatu system dengan menggunakan kapasitor shunt adalah

$$C = \frac{1}{2\pi \times (f) \times X_c} \dots\dots\dots(2.21)$$

Sedangkan untuk menghitung nilai  $X_c$  adalah

$$Z_c = X_c = \frac{(KV)^2}{jQ_c} = \dots\Omega \dots\dots\dots(2.22)$$

Dalam perbaikan faktor daya untuk kenaikan profil tegangan pada system tenaga listrik Indonesia mengacu pada ketentuan dari PT.PLN (PERSERO). Batas ambang atas tegangan untuk system transmisi 150kV adalah 5%, yaitu 157,5 kV, sedangkan batas ambang bawah tegangan untuk system transmisi 150kV adalah 10% yaitu 135kV. <sup>[9daftarpustaka mas ram]</sup>

## 2.7 Kompensasi reaktif saluran transmisi<sup>[2]</sup>

Aliran daya aktif dan daya reaktif pada jaringan transmisi tenaga listrik tidak berkaitan secara langsung satu dengan yang lain karena masing-masing dipengaruhi dan diatur oleh besaran yang berbeda. Pengaturan daya aktif amat erat hubungannya dengan pengaturan frekuensi, dan daya reaktif dapat diatur melalui pengaturan tegangan. Frekuensi dan tegangan adalah besaran yang penting dalam penentuan kualitas catu daya dalam sistem tenaga, sehingga pengaturan daya aktif dan daya reaktif menjadi penting untuk menunjukkan penampilan sistem tenaga listrik. Tegangan dan frekuensi pada setiap titik beban diharapkan konstan dan bebas dari harmonik serta besar faktor daya satu. Kemampuan sistem tenaga untuk mendekati kondisi ideal di atas merupakan ukuran kualitas suatu pengiriman daya <sup>[1]</sup>.

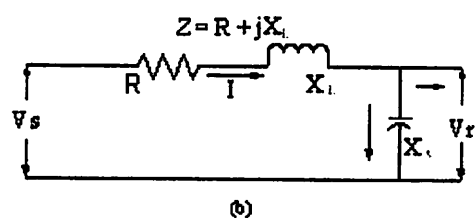
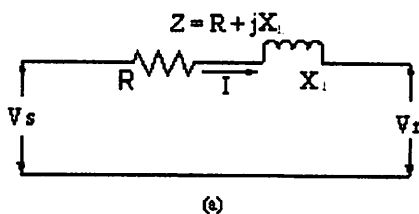
Agar efisiensi dan kemampuan operasi sistem tenaga meningkat, pengaturan tegangan dan daya reaktif harus memenuhi sasaran sebagai berikut :

- Tegangan yang dipakai pada terminal-terminal peralatan dalam sistem tersebut harus dalam batas yang diijinkan. Jika menggunakan tegangan di luar batas kemampuan, akan mengakibatkan efek yang buruk bagi suatu peralatan.
- Meningkatkan stabilitas sistem sampai mendekati nilai maksimalnya agar dicapai suatu keadaan yang mendekati ideal.
- Mengurangi susut energi  $RX_{sal}$  untuk memaksimalkan penyaluran energi pada STTL.

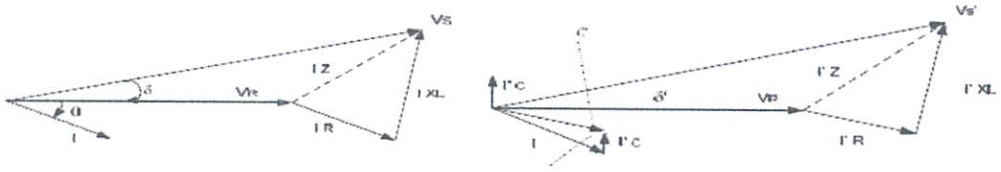
Karena daya reaktif tidak dapat ditransmisikan dalam jarak yang jauh, maka diperlukan peralatan tambahan untuk mengatasinya. Kemampuan kerja

saluran transmisi, terutama dari yang pendek, menengah, dan panjang, dapat diperbaiki dengan perangkat kompensasi reaktif jenis seri atau *shunt*. Kompensasi *shunt* pada saluran transmisi dapat direpresentasikan oleh kapasitor *shunt* dan reactor *shunt* sebagai sumber daya reaktif. Kompensasi *shunt* merupakan penempatan kapasitor maupun reactor secara shunt antara masing-masing saluran dan netral untuk mengurangi sebagian atau menghilangkan sama sekali susseptansi shunt saluran tegangan tinggi, yang terutama penting pada keadaan beban yang ringan dimana tegangan ujung penerima dapat menjadi sangat tinggi, jika tidak dilakukan kompensasi. Sehingga kompensasi diperlukan untuk menjaga agar tegangan tidak melebihi batas-batas yang diijinkan.

Pada kondisi kebutuhan daya nyata dan reaktif yang cukup besar maka tegangan cenderung jatuh melewati batas yang diijinkan. Untuk mengatasi kondisi demikian maka dipasang kapasitor *shunt* yang dapat menyuplai daya reaktif sehingga tegangan dapat naik kembali. Pada kondisi kebutuhan daya nyata dan reaktif sangat kecil maka pengaruh dari kapasitansi saluran akan menyebabkan naiknya tegangan di sisi penerima melewati batas yang diizinkan. Pemasangan reaktor *shunt* akan menyerap pelepasan muatan dari kapasitansi saluran sehingga tegangan turun kembali.



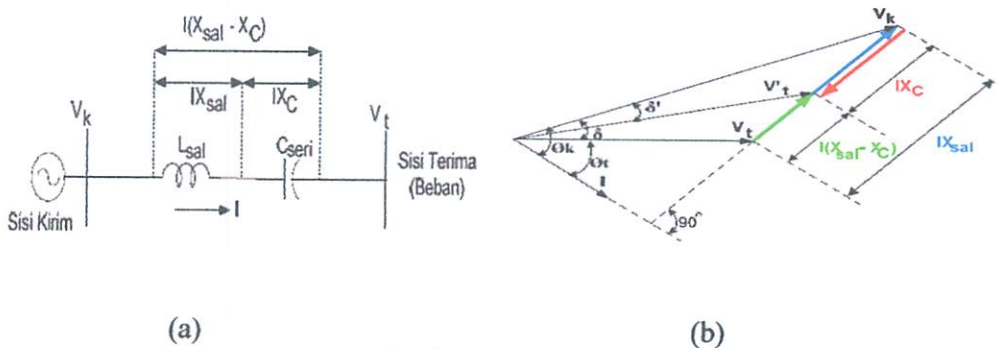




Gambar 2.8

Rangkaian ekuivalen dari saluran, diagram vector pada rangkaian pada factor daya lagging, tanpa kapasitor *shunt* (a) dan dengan kapasitor *shunt*(b)

Kompensasi seri dilakukan dengan memasang kapasitor secara seri disalah satu atau kedua ujung STTL, atau di tengah STTL. Pemasangan di tengah saluran akan memakan biaya lebih mahal karena membangun gardu khusus baru. Prinsip utamanya adalah mengurangi reaktansi ekuivalen saluran ( $X_{sal}$ ) dengan memasukkan reaktansi kapasitif kapasitor secara seri ke STTL.



Gambar 2.9

Rangkaian ekuivalen dari saluran (a) dan diagram fasor (b) setelah dikompensasi seri

Perbaikan regulasi tegangan terlihat pada gambar 2.5, yaitu dengan berkurangnya jatuh tegangan di STTL ( $\Delta V$ ) :

$$\Delta V = V_k - V_t = (I)(X_{sal}) \longrightarrow \text{sebelum}$$

$$\text{dikompensasi seri} \dots \dots \dots (2.23)$$

$$\Delta V' = V_k - V_t' = I X_{sal} - X_C \longrightarrow \text{setelah dikompensasi seri} \dots \dots \dots (2.24)$$

dimana,

- $V_t$  = tegangan sisi terima sebelum dikompensasi seri
- $V_k$  = tegangan sisi kirim = konstan
- $V'_t$  = tegangan sisi terima setelah dikompensasi seri  $\longrightarrow V'_t > V_t$
- $\emptyset$  = sudut fasa antara  $I$  dan  $V_t$  = sudut fasa beban = konstan
- $\emptyset_k$  = sudut fasa antara  $I$  dan  $V_k$  = sudut fasa sistem (yang dilihat dari sumber)
- $I$  = arus STTL
- $I_{xsal}$  =  $\Delta V$  = jatuh tegangan saluran sebelum dikompensasi seri
- $I_{XC}$  = jatuh tegangan dikapasitor seri
- $I(X_{sal} - X_C)$  =  $\Delta V'$  = jatuh tegangan saluran setelah dikompensasi seri
- $\delta$  = sudut daya antara  $V_k$  dan  $V_t$  sebelum dikompensasi seri
- $\delta'$  = sudut daya antara  $V_k$  dan  $V'_t$  setelah dikompensasi seri

Maka, bisa diperoleh persamaan tegangan (berdasarkan Gambar 2.9(a) dan 2.9 (b) yaitu :

$$V_k = V_t + j(I)(X_{sal}) \longrightarrow \text{sebelum dikompensasi seri} \dots \dots \dots (2.25)$$

$$V_k = V_t + j(I)(X_{sal} - X_C) \longrightarrow \text{setelah dikompensasi seri} \dots \dots \dots (2.26)$$

## 2.8. Peralatan Elektronika Daya

### 2.8.1. Transistor Bipolar

Transistor bipolar sangat lebih lambat daripada *MOSFET*. Secara prinsip, hal ini disebabkan oleh waktu gulir mati (*turn-off*) piranti bipolar yang lebih panjang. Kedua adalah resistansi saat kondisi menyambung (*on-state*) piranti

bipolar yang relatif tak bergantung (bersifat invarian) terhadap temperatur, dibandingkan dengan adanya nilai koefisien temperatur yang tinggi pada *MOSFET*. Informasi koefisien temperatur ini merupakan pertimbangan penting dalam perencanaan batas aman thermal pada sistem-sistem yang berdaya tinggi.

### **2.8.2 *Metal Oxide Semiconductor FET (MOSFET)***

*Power MOSFET* adalah piranti elektronika daya konvensional yang beroperasi pada tegangan tinggi dan rugi konduksi yang rendah. Sebelum adanya kemajuan kinerja *power MOSFET*, gelanggang penyalaklar daya dulunya memang didominasi oleh BJT (*bipolar junction transistor*), dan SCR yang sulit untuk dimatikan (*turn-off*) dan lambat. *MOSFET* merupakan piranti elektronik yang dikendalikan oleh tegangan, dengan kebutuhan akan daya pengemudi yang relatif kecil saja. Sementara itu, pada transistor bipolar yang sifatnya dikendalikan oleh arus, ia memerlukan pengemudi dengan daya yang relatif lebih besar.

Dalam hal kapasitansi masukan, untuk *MOSFET*, bergantung pada ratingnya (kemampuan arusnya). Kapasitansi ini dapat menjadi demikian besar, sehingga rangkaian pengemudinya dituntut memiliki kemampuan untuk mengisi dan membuang dengan cepat muatan kapasitansi yang besar ini. Rugi penyalaklaran (*switching losses*) dari piranti ini sangat kecil, hal ini menandakan bahwa *MOSFET* memiliki transisi saat menyambung (*turn-on*) dan memutus (*turn-off*) sangat cepat.

### 2.8.3 *Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)*

*IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)*, merupakan piranti atau komponen aktif pokok yang kini banyak digunakan dalam bidang Elektronika Daya, seperti UPS (*Uninterruptible Power Supply*), dan sistem pengendali daya atau motor-motor besar di bidang industri.

Adanya suatu kendala tentang kecepatan respon penyakelar (*Switching Devices*) antara lain sulit untuk dimatikan (*turn-off*) dan lambat. Maka dalam hal ini dipilih *IGBT* yang memiliki kemampuan lebih baik.

### 2.8.4 Perbandingan Umum Antara Kinerja *MOSFET* dan *IGBT*

Perbandingan kinerja penyakelaran *MOSFET* dan *IGBT* secara singkat dinyatakan dalam Tabel 2.1. Untuk tujuan komparasi, Tabel 2.1 tersebut juga menyertakan pula perbandingannya dengan transistor bipolar. Besaran tegangan kolektor-emitor dalam kondisi menyambung atau jenuh ( $V_{CEsat}$ ) yang biasa digunakan untuk menggambarkan karakter suatu *IGBT*, dalam Tabel 1 tersebut ditranslasikan ke dalam besaran resistansi kolektor-emitor dalam kondisi menyambung ( $R_{on}$ ).

Tabel 2.1  
Perbandingan tiga piranti penyakelar daya untuk kemampuan (rating) yang setara

Karakteristik	<i>MOSFET</i>	<i>IGBT</i>	Bipolar
Kemampuan arus (A)	20	20	20
Kemampuan tegangan (V)	500	600	500

$R_{on}$ (ohm) Pada 25° C	0,2	0,24	0,18
$R_{on}$ (ohm) Pada 150° C	0,6	0,23	0,24
Waktu turun (nanodetik)	40	200	200

Dua fakta yang bersumber pada Tabel 2.1 tersebut adalah bahwa; pertama, transistor bipolar sangat lebih lambat daripada *MOSFET*. Secara prinsip, hal ini disebabkan oleh waktu gulir mati (*turn-off*) piranti bipolar yang lebih panjang. Kedua adalah resistansi saat kondisi menyambung (*on-state*) piranti bipolar yang relatif tak bergantung (bersifat invarian) terhadap temperatur, dibandingkan dengan adanya nilai koefisien temperatur yang tinggi pada *MOSFET*. Informasi koefisien temperatur ini merupakan pertimbangan penting dalam perencanaan batas aman thermal pada sistem-sistem yang berdaya tinggi.

Tabel 2.2 menyatakan perbandingan yang lebih umum mengenai karakteristik penyakelarnya. Disebabkan oleh struktur masukan gate-nya, *MOSFET* dan *IGBT* merupakan piranti elektronik yang dikendalikan oleh tegangan, dengan kebutuhan akan daya pengemudi yang relatif kecil saja. Sementara itu, pada transistor bipolar yang sifatnya dikendalikan oleh arus, ia memerlukan pengemudi dengan daya yang relatif lebih besar.

Dalam hal kapasitansi masukan, untuk *MOSFET* dan *IGBT*, bergantung pada ratingnya (kemampuan arusnya). Kapasitansi ini dapat menjadi demikian besar,

sehingga rangkaian pengemudinya dituntut memiliki kemampuan untuk mengisi dan membuang dengan cepat muatan kapasitansi yang besar ini.

*IGBT* tampaknya memang menawarkan rating kemampuan arus yang lebih baik. Namun demikian, kekurangan dan kelebihan masing-masing piranti yang tercantum pada Tabel 2.2 tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk memilih salah satu di antara ketiganya.

Tabel 2.2  
Perbandingan Karakteristik Piranti Penyakelar Daya

Karakteristik	<i>MOSFET</i>	<i>IGBT</i>	Bipolar
Tipe pengemudi	Tegangan	Tegangan	Arus
Daya pengemudi	minimum	Minimum	Besar
Tingkat kerumitan pengemudi	Sederhana	Sederhana	Cukupan atau sedang
Kemampuan arus pada nilai tegangan drop di ujung-ujung terminal piranti	Tinggi pada teg. rendah; rendah pada teg. tinggi	Sangat tinggi (terpengaruh oleh kecepatan penyakelaran)	Cukupan (sangat terpengaruh oleh kecepatan penyakelaran)
Rugi penyakelaran	Sangat rendah	Rendah sampai sedang (dipengaruhi oleh rugi konduksi)	Sedang sampai tinggi (dipengaruhi oleh rugi konduksi)

Untuk mempertahankan nilai resistansi yang tetap rendah, pembuat *IGBT* membuat kemampuan arus yang lebih rendah untuk tipe yang lebih cepat. Sebagai contoh, Perusahaan *International Rectifier* (IR) di pasaran menawarkan tiga tipe



*IGBT*; yakni tipe standar, cepat dan ultra cepat. IR mendeskripsikan kemampuan arus dengan perbandingan terbalik terhadap kecepatan penyakelarnya. Parameter terakhir dalam Tabel 2.2 tersebut adalah rugi penyakelaran (*switching losses*), yang mencerminkan kecepatan penyakelaran dari ketiga piranti elektronik tersebut. Untuk *MOSFET*, baik transisi saat menyambung (*turn-on*) dan memutus (*turn-off*) sangat cepat. Sedang untuk *IGBT*, kita dihadapkan pada kenyataan bahwa ada perimbangan dalam hal kecepatan penyakelaran versus kemampuan arus; jenis yang lebih cepat akan mengalami rugi konduksi yang lebih tinggi. Waktu penyakelaran pada *IGBT* sebagian besar didominasi oleh waktu saat menyambung, sehingga secara garis besar membatasi penggunaannya dalam sistem yang beroperasi pada laju penyakelaran yang lebih rendah dari pada 100 kHz.

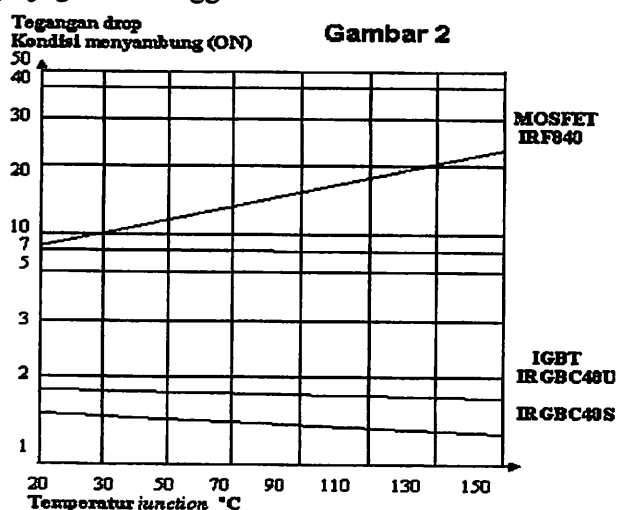
Tabel 2.3  
Perbandingan tegangan drop dan rating tegangan antara *IGBT* dan *MOSFET*

Rating Tegangan (Volt)	<i>IGBT</i>	100	300	600	1200
	<i>MOSFET</i>	100	250	500	1000
Tegangan drop untuk 1,7 ampere per mm <sup>2</sup> pada temperatur 100°C (Volt)	<i>IGBT</i>	1,5	2,1	2,4	3,1
	<i>MOSFET</i>	2,0	11,2	26,7	100

Tabel diatas menunjukkan perbandingan *IGBT* dengan *MOSFET* dalam hal rugi konduksi yang dinyatakan dalam bentuk tegangan drop (tegangan yang terdapat pada kedua ujung terminalnya saat pirantai tersebut dalam keadaan menyambung) untuk kondisi kemampuan arus pada luasan (area) piranti maupun temperatur yang sama. Pada *MOSFET*, untuk kemampuan arus yang sama per satuan luasan

silikon, resistansi dalam kondisi menyambung naik secara ekponensial terhadap rating tegangannya. Sementara itu, untuk piranti *IGBT* (yang dinyatakan dalam besaran tegangan kolektor-emitor jenuh ketimbang resistansi dalam kondisi menyambung) lebih mampu mempertahankan rugi konduksi yang rendah untuk semua rating tegangan. Dari Tabel 2.3 tersebut juga dapat diketahui bahwa *MOSFET* memiliki rating tegangan yang sedikit lebih rendah daripada *IGBT*.

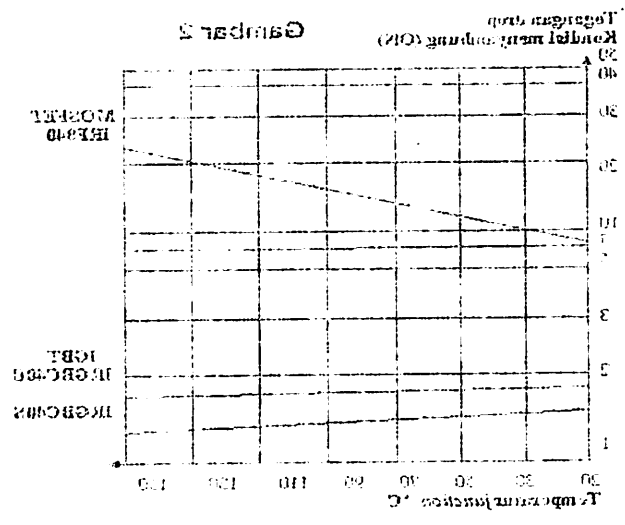
Perbandingan *MOSFET* dan *IGBT* untuk luasan die (irisian tipis bahan semikonduktor yang dipakai untuk membuat transistor atau piranti semikonduktor lainnya) yang sama, secara grafis dinyatakan dalam Gambar 2.10. Pada gambar tersebut, jelas tampak bahwa *IGBT* memiliki rugi pada kondisi menyambung lebih rendah. Grafik tersebut menunjukkan tegangan drop dalam kondisi menyambung untuk sebuah *MOSFET* dan dua *IGBT* hasil produksi IR untuk arus beban 10 ampere. Piranti yang memiliki rugi yang paling rendah dalam gambar tersebut adalah *IRGBC40S*, yakni *IGBT* tipe standar. Tipe ultra cepatnya; *IRGBC40U* menawarkan penyakelaran yang lebih cepat, namun rugi dalam kondisi menyambung juga lebih tinggi.





silikon, resistansi dalam kondisi menyambung naik secara eksponensial terhadap rating tegangannya. Sementara itu, untuk pinna IGBT (yang dinyatakan dalam besaran tegangan kolektor-emitor, jauh lebih rendah resistansi dalam kondisi menyambung) lebih mampu mempertahankan nilai konduksi yang rendah untuk semua rating tegangan. Dari Tabel 2.3 tersebut juga dapat diketahui bahwa

IGBT memiliki rating tegangan yang sedikit lebih rendah daripada GBT. Perbandingan IGBT dan GBT untuk busbar die (jenis tipe busbar semikonduktor yang dipakai untuk membuat transistor bus pinna semikonduktor lainnya) yang sama, secara grafis diwujudkan dalam Gambar 2.10. Pada gambar tersebut jelas tampak bahwa IGBT memiliki nilai pada kondisi menyambung lebih rendah. Grafik tersebut menunjukkan tegangan drop dalam kondisi menyambung untuk sebuah IGBT dan GBT hasil produksi IR untuk arus beban 10 ampere. Pinna yang memiliki nilai yang paling rendah dalam gambar tersebut adalah IRGBC40S, yakni GBT tipe standar. Tipe lain cepatnya IRGBC100 menawarkan penyakelaran yang lebih cepat namun nilai dalam kondisi menyambungnya juga lebih tinggi.

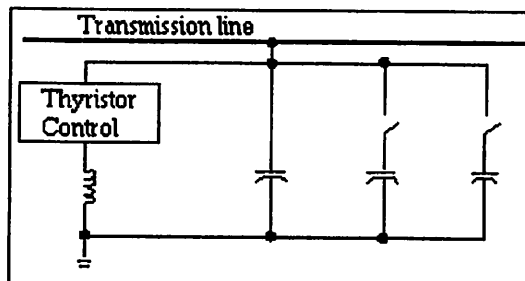


Gambar 2.10  
Tegangan drop kondisi menyambung untuk sebuah *MOSFET* dan dua *IGBT*

## 2.9 Peralatan Kompensasi dalam Sistem Tenaga Listrik

### 2.9.1. *Static VAR Compensator (SVC)*<sup>[3]</sup>

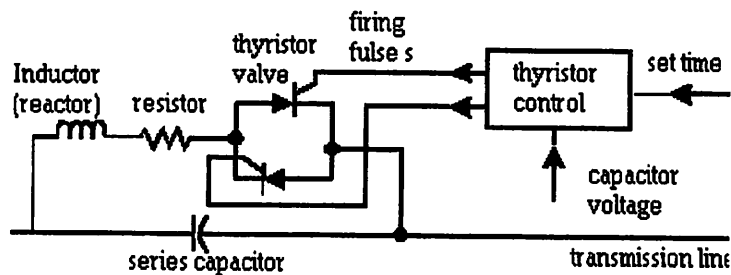
Perkembangan teknologi FACTS telah mengalami dua generasi. Generasi pertama menghasilkan dua jenis peralatan. Alat pertama diberi nama *Static VAR Compensator (SVC)* yang sudah diimplementasikan pada jaringan transmisi listrik semenjak pertengahan tahun 70-an. *SVC* berfungsi sebagai pemelihara kestabilan kondisi *steady state* dan dinamika tegangan dalam batasan yang sudah ditentukan pada jaringan transmisi berjarak jauh dan berbeban tinggi (*heavily loaded*). Fungsi *SVC* diperoleh dengan menggunakan thyristor yang secara cepat dapat menghubungkan atau memutuskan induktor ataupun kapasitor pada jaringan transmisi. Namun kekurangannya, alat ini tidak dapat dipergunakan sebagai alat pengendali aliran daya listrik aktif (*active power*) yang sangat vital dalam sistim jaringan transmisi listrik AC. Lain dari itu, *SVC* juga didapati sangat rendah efisiensinya jika terjadi turunnya tegangan dari transmisi secara drastis. Demonstrasi pertama pemasangan *SVC* dilaksanakan tahun 1978 pada jaringan transmisi 115kV Minnesota Power & Light dan telah berhasil menunjukkan perbaikan kendali stabilisasi dan tegangan pada jaringan transmisi tersebut.



Gambar 2.11  
*Static VAR Compensator*

### 2.9.2 *NGH – Sub Synchronous Resonance (SSR)*

Alat berikutnya yang dikembangkan pada generasi pertama diberi nama NGH-SSR (*Narain G. Hingorani – SubSynchronous Resonance*) Damper. Alat ini dirancang untuk mengatasi permasalahan *subsynchronous resonance (SSR)* yang ditemukan pada jaringan transmisi listrik AC. Jaringan transmisi 500kV Southern California Edison dijadikan tempat pemasangan pertama dari alat ini pada tahun 1980-an setelah SSR mengakibatkan kerusakan fatal pada salah satu generatornya. NGH-SSR seperti yang ditunjukkan gambar 2.12 juga terdiri dari thyristor yang dihubungkan dengan induktor dan tahanan secara seri. Alat inilah yang kemudian menjadi cikal bakal dari salah satu alat yang dikembangkan dalam generasi kedua FACTS yaitu alat yang dikenal dengan nama *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*.

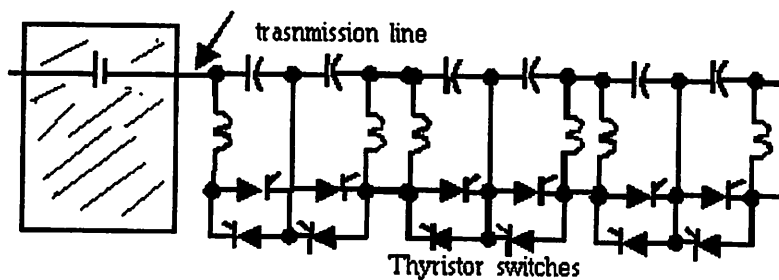


Gambar 2.12  
*NGH - SubSynchronous Resonance*

### 2.9.3 *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*<sup>[3]</sup>

Semakin berkembangnya teknologi dibidang pembuatan *Thyristor* mendorong terciptanya generasi kedua dari FACTS. Pada generasi kedua

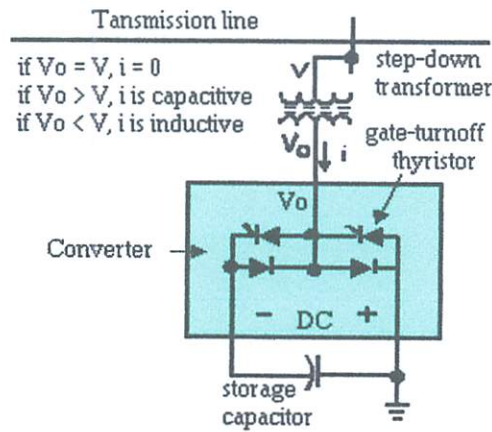
beberapa peralatan FACTS baru telah dikembangkan. Pertama adalah alat yang diberi nama *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)* yang berfungsi sebagai pengendali impedansi dari jaringan transmisi. Seperti diketahui, impedansi sepanjang jaringan transmisi umumnya bersifat induktif sedangkan yang bersifat resistif hanya berkisar 5 sampai 10 persen. Ini berarti akan terasa sangat besar manfaatnya apabila kita mampu mengendalikan impedansi transmisi yang bersifat induktif pada kondisi stabil (*steady state impedance*). Hal ini dapat ditempuh dengan cara penambahan kapasitor dan induktor secara seri. Penghubungan kapasitor secara seri akan berakibat pengurangan impedansi pada transmisi sedangkan penghubungan induktor secara seri akan berarti kenaikan impedansi pada transmisi yang sama. Gambar 2.13 menunjukkan contoh dari *TCSC* yang telah dipasang pada jaringan transmisi 500kV milik Bonneville Power Administration (BPA) dinegara bagian Oregon. Studi kasus pemasangan *TCSC* yang telah dilaksanakan oleh Electric Power Research Institute (EPRI) pada satu jaringan transmisi menunjukkan bahwa *TCSC* berhasil meningkatkan kuantitas aliran daya (dalam MW) sebanyak 30% dengan sekaligus menjaga stabilitas sistim jaringan transmisi tersebut.



Gambar 2.13  
*Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*

#### 2.9.4 *Static Condenser (STATCON)*

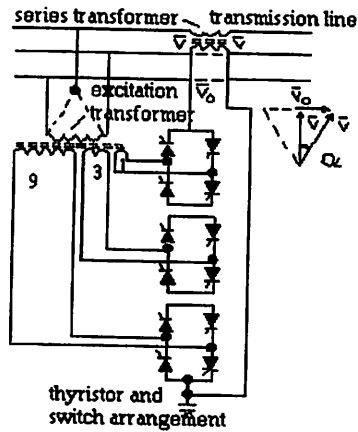
Alat yang kedua diberi nama *Static Condenser (STATCON)* dan berfungsi sebagai penyedia Volt Amp Reactive (VAR) untuk menjaga kestabilan tegangan pada jaringan transmisi yang panjang dan berbeban tinggi (*heavily loaded*). Pada akhirnya nanti, *STATCON* diharapkan untuk dapat menggantikan pemakaian alat *Rotating Synchronous Condensers* yang kini umum dipasang. *STATCON* adalah alat FACTS pertama yang menggunakan tipe thyristor berbeda dari peralatan FACTS sebelumnya. Jenis thyristor yang dipakai adalah jenis GTO (*Gate Turned-Off*). Pada dasarnya, *STATCON* adalah alat yang berbasis inverter tiga fasa yang dihasilkan oleh tegangan satu arah (dc) dari kapasitor seperti yang diilustrasikan oleh Gambar 2.14. Pada gambar tersebut, jika tegangan  $V_0$  lebih tinggi (atau lebih rendah) dari pada tegangan sistim transmisi  $V$ , maka selisih sudut fasa dari kedua tegangan tersebut akan menentukan jumlah arus listrik yang mengalir serta arus listrik akan menjadi lead (atau lag). Dengan jalan demikian, maka daya reaktif beserta arahnya pada sistim transmisi akan dapat dikendalikan secara cepat dan berkelanjutan (*continuous*). Dua contoh studi kasus pemasangan *STATCON* di Amerika Serikat telah dilaksanakan dengan hasil yang memuaskan. Percobaan pertama adalah pemasangan 1 Mvar *STATCON* pada jaringan transmisi milik Orange & Rockland Utilities Inc. di negara bagian New York pada tahun 1989. Sedangkan studi kasus berikutnya adalah pemasangan 100-Mvar *STATCON* pada tahun 1995 di jaringan transmisi Sullivan milik Tennessee Valley Authority (TVA) di negara bagian Tennessee.



Gambar 2.14  
 Static Condenser (STATCON)

### 2.9.5 Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (TCPR)

Selanjutnya adalah alat FACTS yang disebut *TCPR* kependekan dari *Thyristor Controlled Phase angle Regulator*. Fungsi dari alat ini tidak lain adalah sebagai pengendali selisih sudut fasa pada tegangan dari kedua ujung jaringan transmisi yang sama. Fungsi tersebut dimungkinkan dengan cara penyuntikan tegangan secara seri pada jaringan transmisi listrik. Gambar 2.15 menunjukkan konsep dari *TCPR* ini. Penambahan sudut fasa  $\alpha$  pada tegangan transmisi  $V$  dicapai dengan cara menambahkan tegangan  $V_q$  yang tegak lurus terhadap  $V$ . Tegangan  $V_q$  sendiri dihasilkan dari tegangan sekunder dari transformer yang dihubungkan ke dua fasa dari sistim transmisi tiga fasa ini. Percobaan pemasangan *TCPR* telah dilaksanakan dengan sukses diberbagai lokasi jaringan transmisi di Amerika Serikat. Salah satu contoh adalah pemasangan *TCPR* di jaringan transmisi 230kV milik Minnesota Power yang telah terbukti mampu menghasilkan selisih sudut fasa dengan sangat cepat.



Gambar 2.15  
Thyristor Controlled Phase angle Regulator (TCPDR)

### 2.10 Metode Newton Raphson

Metode yang umum digunakan dan banyak disukai untuk mendapatkan penyelesaian aliran daya adalah Metode *Newton Raphson*. Secara matematis persamaan aliran daya *Newton Raphson* dapat diselesaikan dengan menggunakan koordinat rektangulae, koordinat polar atau bentuk hibrid (gabungan antara bentuk kompleks dengan bentuk polar). Dalam pembahasan skripsi ini menggunakan bentuk polar.

Hubungan antara arus  $I_p$  dengan tegangan simpul  $V_q$  pada suatu jaringan dengan simpul  $n$  dapat dituliskan :

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_{pq} \dots\dots\dots(2.27)$$

Injeksi daya pada simpul  $p$  adalah :

$$S_p = P_p - jQ_p = V_p^* \cdot I_p \dots\dots\dots(2.28)$$

$$= V_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_{pq} \dots\dots\dots(2.29)$$

Dalam penyelesaian aliran daya dengan *Newton Raphson* bentuk persamaan aliran daya yang dipilih adalah polar, dimana tegangan dinyatakan dalam bentuk polar, yaitu :

$$V_p^* = |V_p| e^{-j\delta_p}$$

$$V_q = |V_q| e^{-j\delta_q}$$

$$V_{pq} = |V_{pq}| e^{-j\theta_{pq}}$$

Maka persamaan (6.8) dapat ditulis :

$$P_p - jQ_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |V_q| |Y_{pq}| e^{-j(\delta_p - \delta_q + \theta_{pq})} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dengan memisahkan bagian riil dan bagian imajiner maka diperoleh :

$$P_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |V_q| |Y_{pq}| \cos(\delta_p - \delta_q + \theta_{pq}) \dots\dots\dots(2.31)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |V_q| |Y_{pq}| \sin(\delta_p - \delta_q + \theta_{pq}) \dots\dots\dots(2.32)$$

Kedua persamaan diatas akan menghasilkan suatu kumpulan persamaan serempak (simultan) yang tidak linier untuk setiap simpul sistem tenaga listrik. Untuk mengetahui magnitudo tegangan (V) dan sudut fasa ( $\delta$ ) disetiap simpul dapat diselesaikan dengan menggunakan persamaan (6.10) dan (6.11) yang dilinierkan dengan Metode *Newton Raphson* yang dapat dilihat dari persamaan dibawah ini :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.33)$$

Dimana :



$\Delta P$  = selisih injeksi bersih daya nyata dengan penjumlahan aliran daya nyata tiap saluran yang menghubungkan simpul dengan V yang didapat dari perhitungan iterasi ke-k

$\Delta Q$  = selisih injeksi bersih daya reaktif dengan penjumlahan aliran daya nyata tiap saluran yang menghubungkan simpul dengan V yang didapat dari perhitungan iterasi ke-k

$\Delta\delta$  = vektor koreksi sudut fasa tegangan

$\Delta|V|$  = vektor koreksi *magnitude* tegangan

H, L, M, N merupakan elemen-elemen *off* dan diagonal dari sub matriks Jaqobian yang dibentuk dengan mendefinisikan persamaan (6.10) dan (6.11), dimana :

$$H_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial \delta_q} \qquad N_{pq} = \frac{\partial P_p}{\partial |V_q|}$$

$$M_{pq} = \frac{\partial Q_p}{\partial \delta_q} \qquad L_{pq} = \frac{\partial Q_p}{\partial |V_q|}$$

Persamaan (6.12) diselesaikan untuk menghitung vektor koreksi *magnitude* tegangan  $\Delta(|V|)$  dan sudut fasa tegangan ( $\Delta\delta$ ) yang baru. Sehingga diperoleh harga *magnitude* tegangan dan sudut fasa yang baru, yaitu :

$$|V|^{k+1} = |V|^k + \Delta|V|^k \dots\dots\dots(2.34)$$

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta\delta^k \dots\dots\dots(2.35)$$

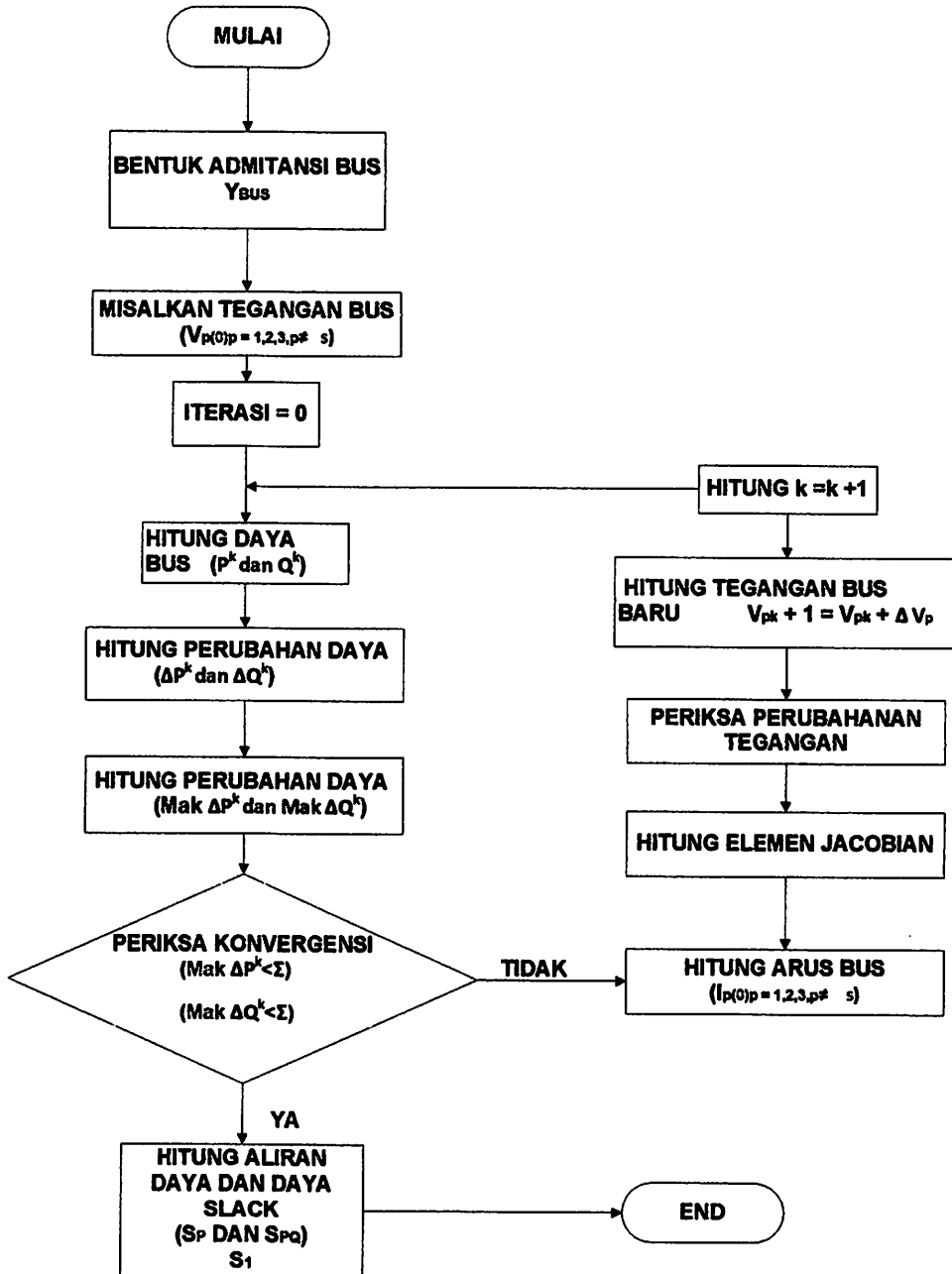
Proses perhitungan akan berulang sampai selisih daya nyata dan daya reaktif antara yang dijadwalkan dengan yang dihitung, yaitu  $\Delta P$  dan  $\Delta Q$  untuk

semua simpul mendekati nilai toleransi atau perhitungan iterasi mencapai konvergen.

### 2.10.1 Algoritma Aliran Daya *Newton Raphson*

1. Tentukan nilai  $P_p$  (ditetapkan) dan  $Q_p$  (ditetapkan) yang mengalir ke dalam sistem pada setiap rel untuk nilai yang ditentukan atau dari perkiraan dari besar dan sudut tegangan untuk iterasi pertama atau tegangan yang ditentukan paling akhir untuk iterasi berikutnya.
2. Hitung  $\Delta p$  pada setiap rel.
3. Hitung nilai-nilai matrik Jacobian dengan menggunakan nilai – nilai perkiraan atau yang ditentukan dari besar dan sudut tegangan dalam persamaan untuk turunan parsial yang ditentukan dengan differensiasi persamaan (3.5) dan (3.6).
4. Hitung koreksi – koreksi tegangan  $\delta q$  dan  $\Delta|Vq|$  pada nilai sebelumnya.
5. Hitung nilai baru dari  $\delta q$  dan  $|Vq|$  dengan menambahkan  $\Delta\delta$  dan  $\Delta|Vq|$  pada nilai sebelumnya.
6. Kembali ke langkah pertama dan ulangi proses itu dengan menggunakan nilai untuk besar dan sudut tegangan yang di tentukan paling akhir sehingga semua nilai  $\Delta p$  dan  $\Delta q$  atau sama nilai  $\Delta\delta$  dan  $\Delta|Vq|$  lebih kecil dari suatu indeks ketetapan yang dipilih.

### 2.10.2 Flowchart Algoritma Aliran Daya *Newton Raphson*



Gambar 2.16  
Flowchart Algoritma Aliran Daya *Newton Raphson*

## 2.11. Metode Algoritma Genetika

Algoritma Genetika merupakan metode *adaptive* yang biasa digunakan untuk memecahkan suatu pencarian nilai dalam sebuah masalah optimasi. Algoritma ini didasarkan pada proses genetik yang ada dalam makhluk hidup yaitu perkembangan generasi dalam sebuah populasi yang alami, secara lambat laun mengikuti prinsip seleksi alam “siapa yang kuat, dia yang bertahan (*survive*)”. Dengan proses ini, algoritma genetika dapat digunakan untuk mencari solusi permasalahan-permasalahan dalam dunia nyata.

Algoritma Genetika ditemukan oleh John Holland pada tahun 1970 yang dilandasi oleh sifat-sifat evolusi alam. Holland percaya bahwa ini sangat cocok digabungkan dalam sebuah algoritma komputer, menghasilkan sebuah teknik penyelesaian untuk permasalahan-permasalahan yang sulit dengan langkah alami yaitu melalui evolusi. John Holland mulai bekerja dengan algoritma yang dibentuk dari string-string biner 1 dan 0 yang disebut kromosom. Seperti halnya alam, algoritma ini menyelesaikan permasalahan-permasalahan dengan menemukan kromosom-kromosom yang baik dengan memanipulasi materi dan sifat (*gene*) kromosom-kromosom. Algoritma ini tidak mengetahui tipe permasalahan yang akan diselesaikan. Hanya informasi yang telah diberikan dari *evaluasi* berupa nilai *fitness* setiap kromosom dengan nilai *fitness* terbaik yang bertahan hidup dan selalu diproduksi.

Sebelum Algoritma Genetika dijalankan maka sebuah kode yang sesuai (representasi) untuk persoalan harus dirancang. Titik solusi dalam ruang permasalahan dikodekan dalam bentuk kromosom/*string* yang terdiri dari

komponen genetik terkecil yaitu gen. Pemakaian bilangan seperti *integer*, *floating point* dan abjad sebagai *allele* (nilai gen) memungkinkan penerapan operator genetika yaitu proses produksi (*reproduction*), pindah silang (*crossover*), mutasi (*mutation*) untuk menciptakan himpunan titik-titik solusi. Untuk memeriksa hasil optimasi, kita membutuhkan fungsi *fitness* yang menandakan gambaran hasil (*solution*) yang sudah dikodekan. Selama proses, induk harus digunakan untuk reproduksi, pindah silang dan mutasi untuk menciptakan keturunan (*offspring*).

Jika Algoritma Genetika didesain dengan baik, populasi akan mengalami konvergensi dan akan mendapatkan solusi yang optimum.

### **2.11.1 Istilah-Istilah Algoritma Genetika**

Algoritma Genetika menggunakan mekanisme genetika yang ada pada proses alami dan sistem buatan. Istilah-istilah yang digunakan adalah gabungan dari dua

disiplin ilmu, yaitu ilmu biologi dan ilmu komputer. Mitsuo Gen dan Runwei Cheng (1997) menjelaskan istilah-istilah yang digunakan dalam Algoritma Genetika sebagai berikut :

Tabel 2.4  
Istilah yang digunakan dalam Algoritma Genetika

Istilah	Keterangan
Kromosom	Individu berupa segmen string yang sudah ditentukan
Gen	Bagian dari string
Loci	Posisi dari gen
Allele	Nilai yang dimasukkan dalam gen
Phenotype	String yang merupakan solusi terakhir
Genotype	Sejumlah string di hasil perkawinan yang berpotensi sebagai solusi

Terdapat beberapa parameter yang digunakan dalam Algoritma genetika. Parameter tersebut digunakan untuk melihat kompleksitas dari Algoritma genetika. Parameter yang digunakan tersebut adalah :

### 1. Jumlah Generasi (MAXGEN )

Merupakan jumlah perulangan (iterasi) dilakukannya rekombinasi dan seleksi. Jumlah generasi ini mempengaruhi kestabilan output dan lama iterasi (waktu proses Algoritma Genetika). Jumlah generasi yang besar dapat mengarahkan ke arah solusi yang optimal, namun akan membutuhkan waktu yang lama. Sedangkan jika jumlah generasinya terlalu sedikit maka solusi akan terjebak pada lokal optimum.

### 2. Ukuran Populasi (POPSIZE)

Ukuran populasi mempengaruhi kinerja dan efektivitas dari Algoritma Genetika. Jika ukuran populasi kecil maka populasi tidak menyediakan cukup

materi untuk mencakup ruang permasalahan, sehingga pada umumnya kinerja Algoritma Genetika menjadi buruk. Dalam hal ini dibutuhkan ruang yang lebih besar untuk mempersentasikan keseluruhan ruang permasalahan. Selain itu pengguna populasi yang besar dapat mencegah terjadinya konvergensi pada wilayah lokal.

### **3. Probabilitas *Crossover* ( $P_c$ )**

Probabilitas *crossover* ini digunakan untuk mengendalikan frekuensi operator *crossover*. Dalam hal ini dalam populasi terdapat  $P_c \times POPSIZE$  struktur (individu) yang melakukan pindah silang. Semakin besar nilai probabilitas *crossover* maka semakin cepat struktur baru yang diperkenalkan dalam populasi. Namun tingkat probabilitas *crossover* maka struktur dengan nilai fungsi obyektif yang baik dapat hilang lebih cepat dari seleksi. Sebaliknya jika probabilitas terlalu kecil akan menghalangi proses pencarian dalam proses Algoritma Genetika.

### **4. Probabilitas Mutasi ( $P_m$ )**

Mutasi digunakan untuk meningkatkan variasi populasi digunakan untuk menentukan tingkat mutasi yang terjadi, karena frekuensi terjadinya mutasi tersebut menjadi  $P_m \times POPSIZE \times N$ , dimana  $N$  adalah panjang struktur / gen dalam satu individu. Probabilitas mutasi yang rendah akan menyebabkan gen-gen yang berpotensi tidak dicoba. Dan sebaliknya, tingkat mutasi yang tinggi akan menyebabkan keturunan semakin mirip dengan induknya. Dalam Algoritma Genetika, mutasi menjalankan aturan penting yaitu :

- Mengganti gen-gen yang hilang selama proses seleksi.
- Menyediakan gen-gen yang tidak muncul pada saat instalasi awal populasi

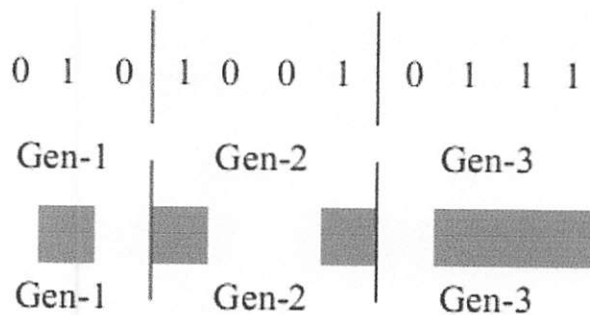
## 5. Panjang Kromosom (NVAR)

Panjang kromosom berbeda - beda sesuai dengan model permasalahan. Titik solusi dalam ruang permasalahan dikodekan dalam bentuk kromosom / *string* yang terdiri dari komponen genetik terkecil yaitu gen. Pengkodean dapat memakai bilangan seperti *string* biner, *integer*, *floating point* dan abjad.

### 2.11.2 Komponen-komponen Utama Pada Algoritma Genetika

#### 2.11.2.1. Teknik Penyandian

Teknik penyandian disini meliputi penyandian gen dari kromosom. Gen merupakan bagian dari kromosom. Satu gen biasanya akan mewakili satu variabel. Gen dapat dipresentasikan dalam bentuk : *string bit*, pohon, *array* bilangan *real*, daftar aturan, elemen program, elemen permutasi, atau representasi lainnya yang dapat diimplementasikan untuk operator genetika. Gambar 2.17 menunjukkan representasi *string bit*.



Gambar 2.17  
Representasi *String Bit*





Demikian juga, kromosom dapat dipresentasikan dengan menggunakan :

- String bit : 10011, 01101, 11101, dst
- Bilangan *real* : 65.66, -67.98, 562.88, dst
- Elemen permutasi : E2, E5, E10, dst
- Daftar aturan : R1, R2, R3, dst
- Elemen program : pemrograman genetika
- Struktur lainnya.

#### **2.11.2.2. Prosedur Inisialisasi**

Ukuran populasi tergantung pada masalah yang akan dipecahkan dan jenis operator genetika yang akan diimplementasikan. Setelah ukuran populasi ditentukan lalu dilakukan inisialisasi terhadap kromosom yang terdapat pada populasi tersebut. Inisialisasi kromosom dilakukan secara acak namun harus tetap memperhatikan domain solusi dan kendala permasalahan yang ada.

#### **2.11.2.3. Fungsi Evaluasi**

Ada 2 hal yang harus dilakukan dalam melakukan evaluasi kromosom yaitu : evaluasi fungsi objektif (fungsi tujuan) dan konversi

fungsi objektif ke dalam fungsi *fitness*. Selain secara umum, fungsi *fitness* diturunkan dari fungsi objektif dengan nilai yang tidak negatif. Apabila ternyata nilai dari fungsi objektif adalah negatif maka perlu ditambahkan suatu konstanta  $c$  agar nilai *fitness* yang terbentuk menjadi negatif.

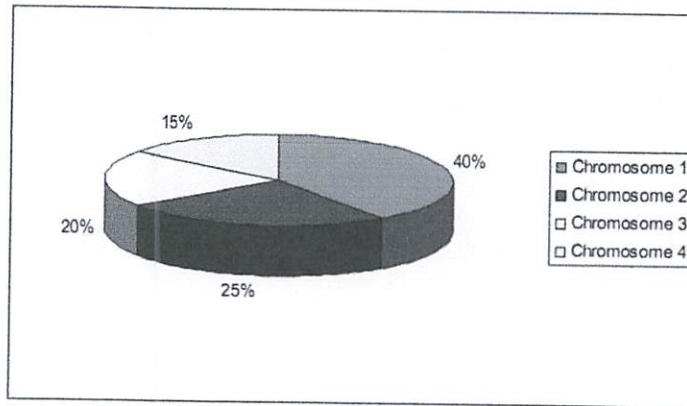
#### 2.11.2.4. Seleksi

Seleksi ini bertujuan untuk memberikan kesempatan reproduksi yang lebih besar bagi anggota populasi yang paling fit. Seleksi akan menentukan individu-individu mana saja yang akan dipilih untuk dilakukan rekombinasi dan bagaimana *offspring* terbentuk dari individu-individu tersebut. Langkah pertama yang harus dilakukan dalam seleksi ini adalah pencarian nilai *fitness*. Masing-masing individu dalam suatu wadah seleksi akan menerima probabilitas reproduksi yang tergantung pada nilai objektif dirinya sendiri terhadap nilai objektif dari semua individu dalam wadah seleksi tersebut. Nilai *fitness* inilah yang nantinya akan digunakan pada tahap-tahap seleksi berikutnya. Ada beberapa metode seleksi dari induk, antara lain :

##### 1. Roulette Wheel Selection

Metode seleksi *roulette* ini merupakan metode yang paling sederhana dan sering juga dikenal dengan nama *stochastic sampling with replacement*. Dimana setiap individual memiliki harga *fitness* sehingga didapatkan probabilitas individual ( $f_i / \sum f_i$ ) tersebut di *copykan* pada populasi yang baru. Untuk individual yang memiliki probabilitas 20% untuk jumlah populasi 10 maka

kemungkinan individual tersebut dapat terpilih sebanyak dua kali. Ilustrasi kerja operator ini dapat digambarkan seperti pada gambar 2.18 :

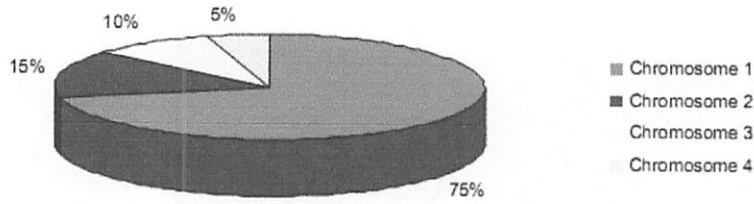


Gambar 2.18  
*Roulette-Wheel Selection*

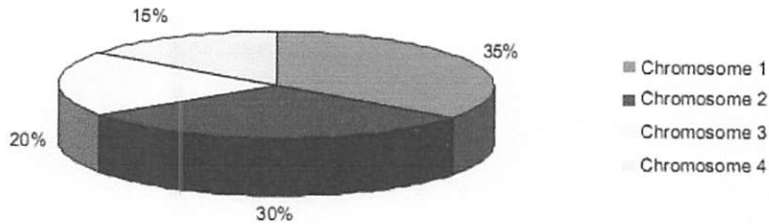
## 2. Rank Selection

Apabila *fitness* yang dimiliki oleh suatu kromosom dalam populasi berbeda terlalu jauh dari kromosom lainnya maka hal ini dapat menjadi permasalahan. Misalnya bila kromosom terbaik mempunyai *fitness* yang menyebabkan besarnya tempat yang dimilikinya dalam *roulette wheel* sebesar 90% maka kromosom-kromosom yang lain akan mempunyai peluang yang terlalu kecil untuk diseleksi.

*Rank selection* pertama kali merangking populasi dan kemudian setiap kromosom diberi nilai *fitness* baru berdasarkan hasil rangking tersebut. Yang pertama akan mempunyai *fitness* 1, yang kedua akan mempunyai *fitness* 2 dan seterusnya sampai mempunyai *fitness* N. Dengan demikian semua kromosom akan mempunyai peluang untuk diseleksi.



Gambar 2.19  
Keadaan Sebelum *Ranking*



Gambar 2.20  
Keadaan Sesudah *Ranking*

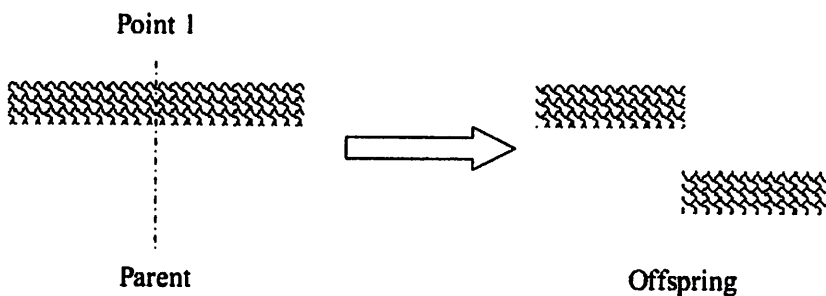
### 2.11.2.5. Operator Genetika

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

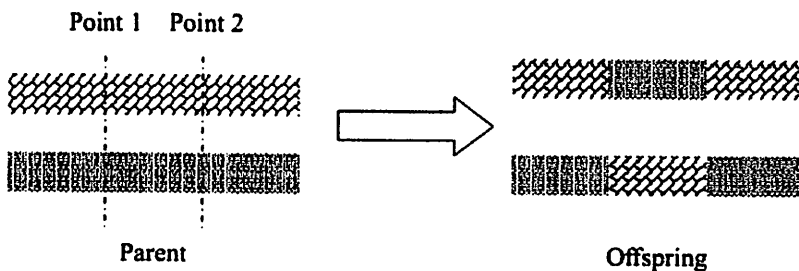
Fungsi dari *crossover* adalah menghasilkan kromosom anak dari kombinasi materi-materi gen dua kromosom induk. Cara kerjanya dengan membangkitkan sebuah nilai random  $r_k$  dimana  $k = 1, 2, 3, \dots, \text{POPSIZE}$ . Probabilitas *crossover* ( $P_c$ ) ditentukan dan digunakan untuk mengendalikan frekuensi operator *crossover*. Apabila nilai  $r_k < P_c$  maka kromosom ke- $k$  terpilih untuk mengalami *crossover*. *Crossover* yang paling sederhana adalah *one point crossover*. Posisi titik persilangan (*point*) ditentukan secara random pada range satu sampai panjang kromosom. Kemudian nilai *offspring* diambil dari dua

*parent* tersebut dengan batas titik persilangan tersebut. Ilustrasi kerja operator ini digambarkan seperti pada gambar 2.21

Kemudian ditingkatkan lagi dengan menggunakan *two point crossover*. Penentuan posisi titik persilangan sama seperti *one point crossover* sebelumnya. Pemilihan secara random dilakukan dua kali. Kemudian nilai *offspring* diambil dari dua *parent* tersebut dengan batas dua titik persilangan tersebut. Ilustrasi kerja operator ini digambarkan seperti pada gambar 2.22



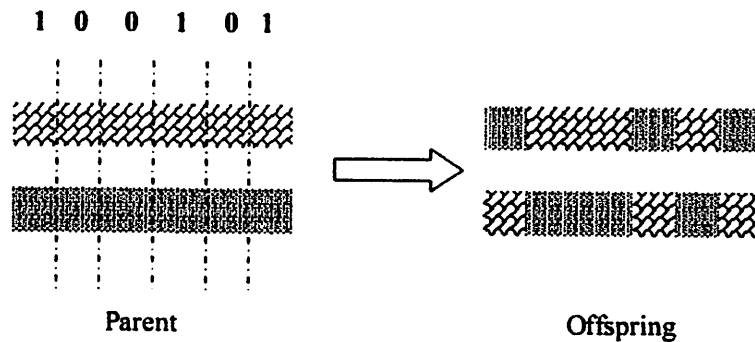
Gambar 2.21  
Ilustrasi Operator Dengan *One Point Crossover*



Gambar 2.22  
Ilustrasi Operator Dengan *Two Point Crossover*

Untuk *crossover uniform* dibangkitkan suatu nilai random 0 dan 1 sepanjang jumlah kromosom untuk nilai loci. Jika nilai yang dibangkitkan mempunyai nilai 1 maka *allele parent 2* dan *offspring 2* untuk loci tersebut

diambil dari *allele parent 1* dan *offspring 2* untuk loci tersebut diambil dari *allele parent 2*. Ilustrasi kerja operator ini digambarkan seperti pada gambar 2.23



Gambar 2.23  
Ilustrasi Operator *Crossover* Dengan *Uniform Crossover*

## 2. Mutation (Mutasi)

Operator mutasi digunakan untuk memodifikasi satu atau lebih nilai gen dalam satu individu. Cara kerjanya dengan membangkitkan sebuah nilai random  $r_k$ , dimana  $k = 1,2,3,\dots,NVAR$  (panjang kromosom). Probabilitas mutasi ( $Pm$ ) ditentukan dan digunakan untuk mengendalikan frekuensi operator mutasi. Apabila nilai random  $r_k < Pm$  maka gen ke- $k$  kromosom tersebut terpilih untuk mengalami mutasi. Mutasi dengan mengganti gen 0 dengan 1 atau sebaliknya gen 1 dan 0. biasanya disebut *flip*, yaitu membalik nilai ke 1 atau 1 ke 0.

Fungsi dari operator mutasi adalah untuk menghindari agar solusi masalah yang diperoleh bukan merupakan solusi optimum lokal. Seperti halnya pada operator *crossover*, tipe dan implementasi dari operator mutasi bergantung pada jenis pengkodean dan permasalahan yang dihadapi. Seberapa sering mutasi dilakukan dinyatakan dengan suatu probabilitas mutasi ( $Pm$ ). Posisi elemen pada

kromosom yang akan mutasi ditentukan secara random. Mutasi dikerjakan dengan cara melakukan perubahan pada elemen tersebut.

## 2.12. Peralatan *FACTS devices* Yanga Digunakan.

### 2.12.1. Pemilihan *FACTS devicess*

Aliran daya pada sistem transmisi memenuhi hukum kirchoff. Tahanan pada saluran transmisi lebih kecil dibandingkan dengan reaktansi, sehingga konduktansinya mendekati nol. Daya aktif yang di transmisikan pada saluran transmisi antara bus i dan j dapat dituliskan dalam hubungan sebagai berikut :

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \sin \theta_{ij}$$

(3.1)

$$Q_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} (V_i^2 - V_j \cos \theta_{ij})$$

(3.2)

Dengan :

$V_i$  Dan  $V_j$  = Tegangan pada bus i dan j

$X_{ij}$  = Reaktansi pada saluran

$Q_{ij}$  = Sudut antara  $\bar{V}_i$  Dan  $\bar{V}_j$  ( $\bar{V}$  adalah Phasor)

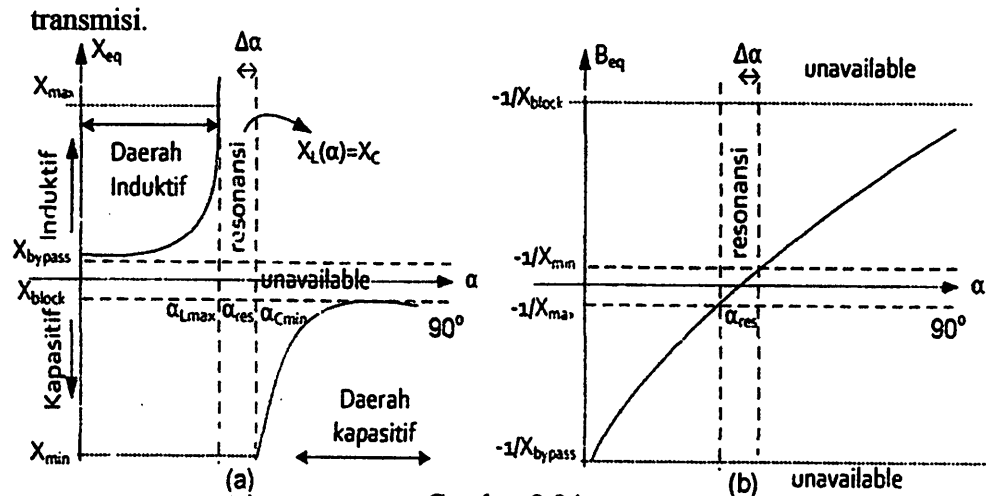
Beda tegangan  $V_i$  dan  $V_j$  pada saluran transmisi dalam kondisi operasi normal sangat kecil, begitu pula halnya dengan  $\theta_{ij}$ . Besar daya aktif tergantung dari



$\theta_{ij}$  dan daya reaktif  $Q_{ij}$  tergantung dari besar  $V_i$  dan  $V_j$  sedangkan perubahan reaktansi  $X_{ij}$  mempengaruhi keduanya. Jenis *FACTS devices* yang dipilih untuk mengontrol aliran daya yaitu : *TCSC*. Reaktansi saluran transmisi dapat diubah dengan menggunakan *TCSC* dan dapat mengontrol daya reaktif.

### 2.12.2 Model Matematika *FACTS devices*

Untuk mendapatkan model matematika *FACTS devices* dilakukan analisis dalam keadaan *steady state*. Oleh karena itu *TCSC* di modelkan untuk mengubah reaktansi saluran transmisi secara langsung. *TCSC* memiliki model matematik yang terintegrasi secara langsung pada model matematik saluran transmisi.



Gambar 2.24

(a) Reaktansi ekivalen  $X_{eq}$  (b) Suceptansi ekivalen  $B_{eq}$  (G.Glanzman and G Anderson, 2004).

#### 2.12.2.1 *TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)*

*TCSC* terdiri dari suatu rangkaian yang dibangun dari *fixed capacitor* paralel dengan induktor yang dapat dikontrol dengan thyristor. Oleh karena itu

reaktansi ekivalen  $X_{eq}$  dari TCSC adalah merupakan fungsi sudut penyalan thyristor :

$$X_{eq}(\alpha) = \frac{-1}{B_L(\alpha) + B_c} \dots\dots\dots(2.36)$$

Dengan

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

$$B_L(\alpha) = -\frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \dots\dots\dots(2.37)$$

$$B_c = \omega c$$

Dari Gambar 2.24(a) terlihat bahwa nilai maksimum dan minimum sudut penyalan thyristor adalah  $0^\circ$  dan  $90^\circ$ . Batas kompensasi maksimum TCSC ( $X_{max}$ ) ditentukan oleh sudut penyalan  $\alpha_{Lmax}$  dan batas kompensasi minimum ( $X_{min}$ ) ditentukan oleh sudut penyalan  $\alpha_{Cmin}$ . Nilai tersebut merupakan rentang nilai yang menyatakan derajat kompensasi dari TCSC. Untuk mencegah kompensasi yang berlebihan, derajat kompensasi dari TCSC yang diijinkan adalah dalam rentang 20% induktif dan 70% kapasitif, sehingga berlaku :

$$r_{TCSC_{min}} = -0.7 \quad r_{TCSC_{max}} = 0.2 \quad \dots\dots\dots(2.38)$$



$$X_{TSC} = X_{MIN} - X_{MAX}$$

Gambar 2.25  
Model TCSC (Lijun Cai, 2004)<sup>[4]</sup>

Gambar 2.25 menunjukkan bahwa rating *TCSC* sangat dipengaruhi oleh reaktansi saluran transmisi :

$$X_{ij} = X_{\text{saluran}} + X_{\text{TCSC}}, \quad X_{\text{TSC}} = r_{\text{TCSC}} \cdot X_{\text{saluran}}$$

Dengan :

$X_{\text{saluran}}$  = reaktansi saluran transmisi

$r_{\text{TCSC}}$  = koefisien kompensasi *TCSC*

### 2.12.2.2 *Static VAR Compensator (SVC)*

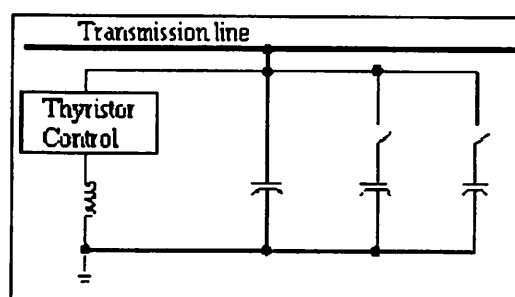
*SVC* berfungsi sebagai pemelihara kestabilan kondisi *steady state* dan dinamika voltase dalam batasan yang sudah ditentukan pada jaringan transmisi berjarak jauh dan berbeban tinggi (*heavily loaded.* ). Fungsi *SVC* diperoleh dengan menggunakan thyristor yang secara cepat dapat menghubungkan atau memutuskan induktor ataupun kapasitor pada jaringan transmisi [8].

Peningkatan kemampuan saluran transmisi dalam mengirimkan daya reaktif sering digunakan kompensator daya reaktif, yang dipasang pada tempat-tempat tertentu baik saluran transmisi maupun pada bus beban. Hal tersebut sangat dipengaruhi oleh tujuan pemakaian dan tipe kompensator daya reaktif yang digunakan. Pada umumnya kompensator daya reaktif digunakan untuk mengontrol aliran daya reaktif, kontrol tegangan untuk menjaga stabilitas tenaga [6].

*Static VAR Compensator (SVC)* adalah salah satu tipe *FACTS devices (Flexible AC Transmission System)* yang terdiri dari komponen reaktor dan kapasitor sebagai sumber daya reaktif, serta dilengkapi peralatan elektronika daya

sebagai *device switching*. Fungsi utama adalah mempertahankan (*controller*) stabilitas tegangan tetap konstan pada terminalnya yaitu dengan mengatur aliran daya reaktif yang diinjeksikan dan yang diserap dari jaringan. Fungsi lainnya untuk meredam *osilasi damping* pada saluran transmisi yang panjang dan berbeban tinggi.

*FACTS devices* untuk pertama kali dikembangkan oleh EPRI (*Electric Power Research Institute*) di Palo Alto Negara bagian California di Amerika Serikat. *SVC* merupakan salah satu tipe *FACTS devices* yang diletakkan pada bus beban (*PQ*) terhubung shunt dengan jaringan. *FACTS devices* tidak memiliki komponen mekanis, artinya secara teknis dan ekonomis lebih handal bila dibandingkan kompensator condenser sinkron. Pada skripsi ini *SVC* berfungsi sebagai kapasitor shunt (*TSC*) sebagai injeksi daya reaktif. Gambar 2.26 menunjukkan contoh dari topologi *SVC* [8].



Gambar 2.26  
*Static VAR Compensator*

#### 2.12.2.2.1. Tipe-Tipe *Static VAR Compensator*

Jenis *Static VAR Compensator* yang digunakan yang digunakan sangat dipengaruhi pada beberapa faktor seperti kebutuhan daya reaktif, karakteristik

rugi-rugi daya, pembangkitan harmonisa dan investasi. Adapun jenis-jenis yang sering dipakai adalah :

1. *Thyristor Controlled Reactor* (TCR)
2. *Thyristor Switched Capacitors* (TSC)
3. *Thyristor Controlled Reactor / Fixed Capacitor* (TCR / FC)

*SVC* yang digunakan dewasa ini gabungan dari ketiga jenis tersebut diatas, hal tersebut dilakukan sesuai dengan kondisi operasional kompensasi daya reaktif yang dikehendaki dengan batasan induktif atau kapasitif.

#### **2.12.2.2.2 *Thyristor Controlled Reactor* (TCR)<sup>[3]</sup>**

Komponen-komponen kontrol TCR thyristor seperti terlihat Gambar 2.27. Dua thyristor yang berlawanan kutub dikonduksikan pada setengah cycle frekuensi suplai. Jika thyristor di trigger tepat pada puncak tegangan suplai akan mengakibatkan konduksi penuh dengan reaktor dan seolah-olah arus yang melewatinya adalah sama dengan jika pengontrol thyristor dihubung singkat. Arus ini pada dasarnya adalah bersifat reaktif, tertinggal terhadap tegangan hampir 90°.



$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \dots\dots\dots(2.38)$$

Sehingga persamaan (2.38) dapat ditulis sebagai berikut :

$$I_i = B_L(\sigma) V \dots\dots\dots(2.39)$$

$B_L(\sigma)$  adalah susceptansi yang dapat diatur pada frekuensi fundamental yang dikontrol oleh sudut konduksi sesuai dengan aturan :

$$B_L(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi X_L} \dots\dots\dots(2.40)$$

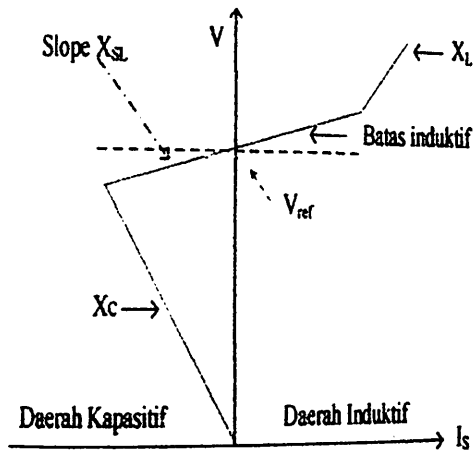
Harga maksimum dari  $B_L$  adalah  $\frac{\sigma}{X_L}$ , diperoleh pada  $\sigma = \pi$ , yaitu konduksi penuh dari kontrol thyristor.

### 2.12.2.2.3 Thyristor Switched Capacitor (TSC)

Susceptansi pada jaringan diatur dengan mengontrol jumlah kapasitor paralel yang terhubung dengan  $k$  kapasitor terhubung paralel, masing-masing dikontrol oleh switch (Gambar 2.28), susceptansi total sama dengan jumlah susceptansi suatu kombinasi dari  $k$  susceptansi tunggal pada suatu waktu, dengan demikian susceptansi total berubah-ubah secara bertingkat dengan cara memasang beberapa kapasitor yang dapat di switch masing-masing.

Untuk  $k$  kapasitor, jumlah step maksimum dapat diperoleh bila tidak ada dua kondisi yang sama, diharapkan paling tidak semua susceptansi individu berbeda. Sistem biner, ada  $(k-1)$  susceptansi dengan harga  $B$  dan satu susceptansi berharga  $B/2$ . Susceptansi setengah ( $B/2$ ) merubah jumlah kombinasi  $k$  menjadi  $2k$ . dengan mengabaikan transisi *switching*, arus ini akan sinusoidal oleh karena itu tidak mengandung harmonisa.

**2.12.2.2.4 Prinsip Kerja SVC**



**Gambar 2.28**  
Keadaan steady state karakteristik V – I

SVC dimodelkan sumber VAR yang variable, sehingga dapat diatur batas maksimum dan minimum, daya output reaktif  $Q_{SVC}$  disesuaikan dengan susceptansi induktif ( $B_{ind}$ ) dan susceptansi kapasitif ( $B_{cap}$ ) yang diinginkan.

$$Q_{max} = B_{ind} \cdot V_{ref}^2 \dots\dots\dots(2.41)$$

$$Q_{min} = B_{cap} \cdot V_{ref}^2 \dots\dots\dots(2.42)$$

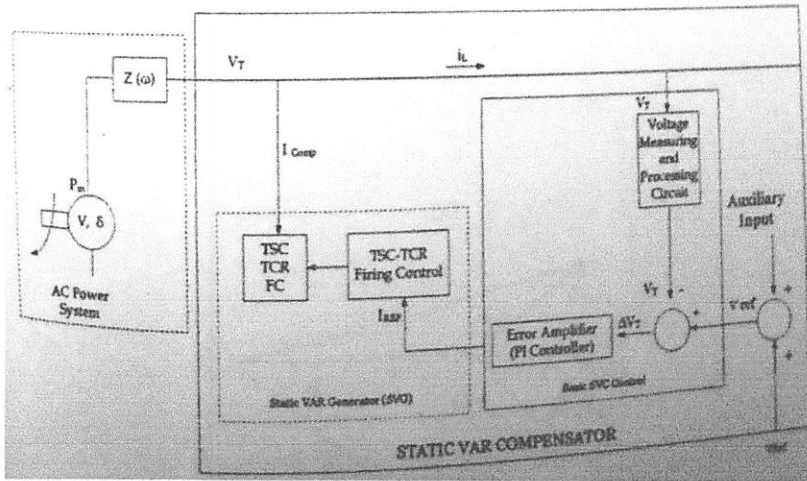
Keterangan :

$$B_{ind} = 1/X_L \text{ dan } B_{cap} = 1/X_C$$

Static VAR Compensator (SVC ) mengatur aliran daya reaktif yang diinjeksikan dan yang diserap dari jaringan (grid), ketika tegangan sistem pada grid rendah (low voltage), SVC akan membangkitkan daya reaktif (SVC Capacitive), yaitu dengan menginjeksikan daya reaktif yang bersumber dari kapasitor bank, setiap kapasitor bank di switch on – off dengan switch thyristor (Thyristor Switched Capacitor / TSC). Ketika tegangan sistem mengalami over



voltage, maka SVC akan menyerap daya reaktif (*SVC Inductive*), oleh reaktor di switch on – off (*Thyristor Switched Reactor / TSR*) atau control phase (*Thyristor Controlled Reactor / TCR*). Pengaturan daya reaktif diperoleh dari Pengaturan sudut penyalan thyristor pada rangkaian inverter, seperti pada Gambar 2.29.



Gambar 2.29  
Line diagram Static VAR Compensator

Penggunaan *FACTS* menjadi alternatif baru pada bidang transmisi tenaga listrik yang dapat meningkatkan kemampuan transfer daya tenaga listrik tanpa harus membangun konstruksi jaringan listrik yang baru, dapat meningkatkan batas kemampuan thermal jaringan transmisi. Kefleksibelan, keefektifan dan kehandalan *FACTS* memberikan keuntungan dalam operasi aliran daya dan kontrol.

## **BAB III**

### **PERBAIKAN LOADABILITY DENGAN *MULTI FACTS DEVICE***

#### **UNTUK MEREDUKSI RUGI – RUGI DAYA DALAM SISTEM**

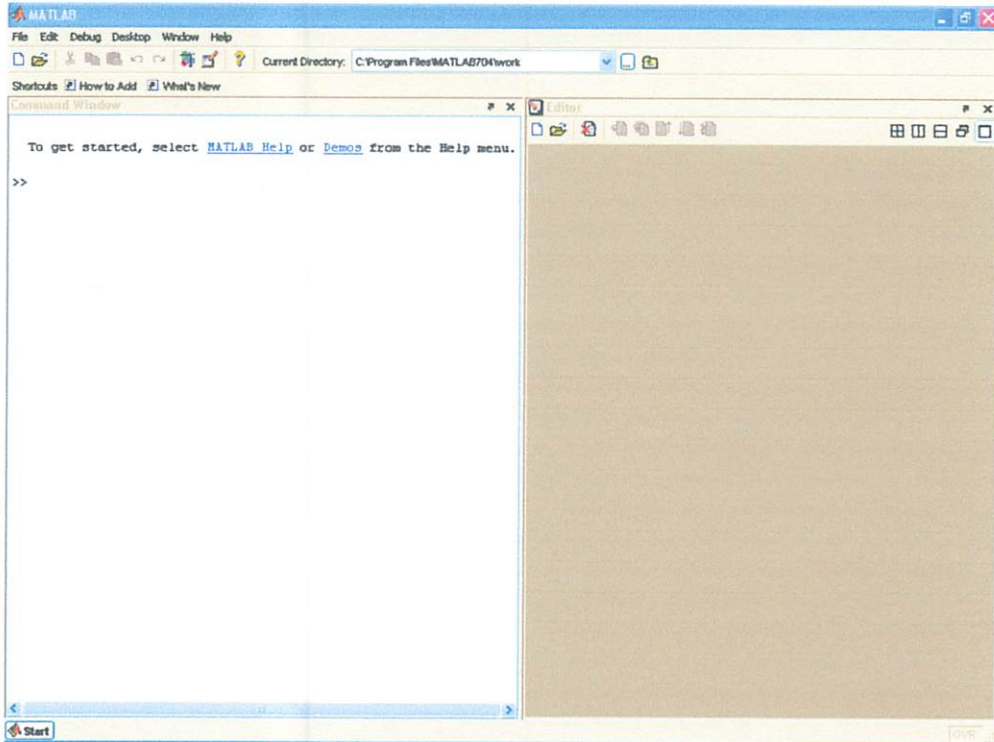
##### **3.1. *Software Matlab versi 6.5***

Matlab adalah sebuah proram untuk menyelesaikan perhitungan ilmiah maupun teknik secara numeric. Matlab dikendalikan dengan perintah – perintah (command) dan karenanya bersifat dapat deprogram. Matlab menggunakan teknik – teknik khusus berbasis matriks untuk menelesaikan persoalan. Dengan cara ini banyak kemudahan yang diperoleh pemakai, selain cra pemrogramannya yang tidak rumit, solusi masalah yang dinyatakan matlab adalah mirip dengan apa yang dituliskan secara matematis.

Ada banyak aplikasi yang dikembangkan oleh para pemakainya, mulai dari pemrosesan sinyal, control otomatis sampai jaringan saraf tiruan. *The Matwork Inc*, yaitu perusahaan yang merealese Matlab menyediakan berbagai versi dari matlab untuk berbagai jenis computer. Sebagai analisis pada skripsi ini digunakan *matlab versi 6.5*. Dimana pada matlab terdapat jenis M.file dan Simulink, masing masing fasilitas mempunyai ciri yang bervariasi. Sehingga konsumen dapat menggunakan fasilitas yang tersedia pada matlab yang sesuai dengan kebutuhan atau perancangan dalam menganalisa suatu sistem tenaga listrik atau desain suatu pembuatan sistem yang kompleks.

### 3.2. Memulai *Software MATLAB*

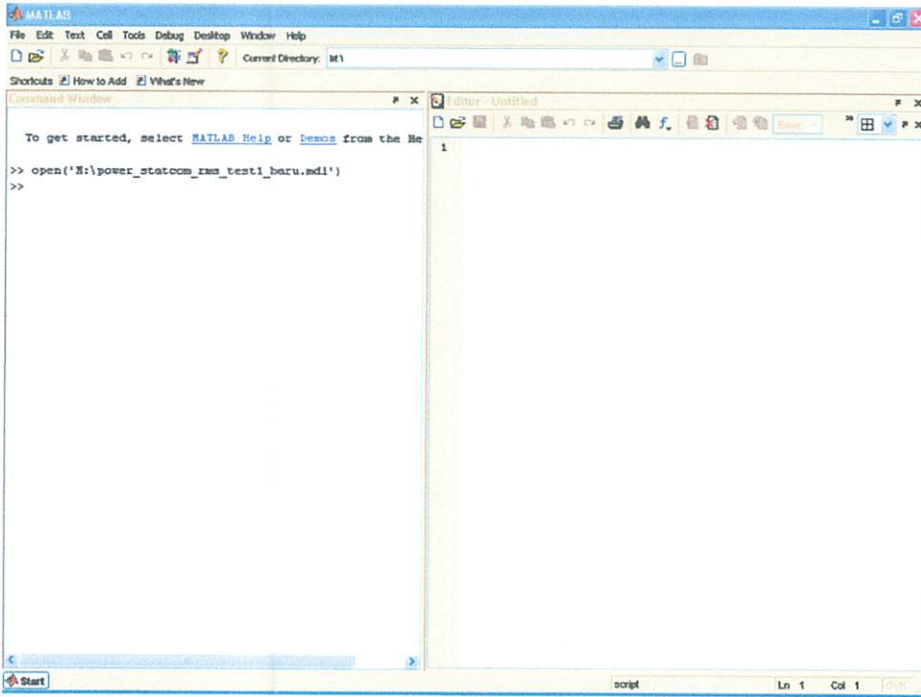
Tampilan utama *software Matlab versi 6.5*



Gambar 3.1  
Tampilan utama *Software Matlab versi 6.5*

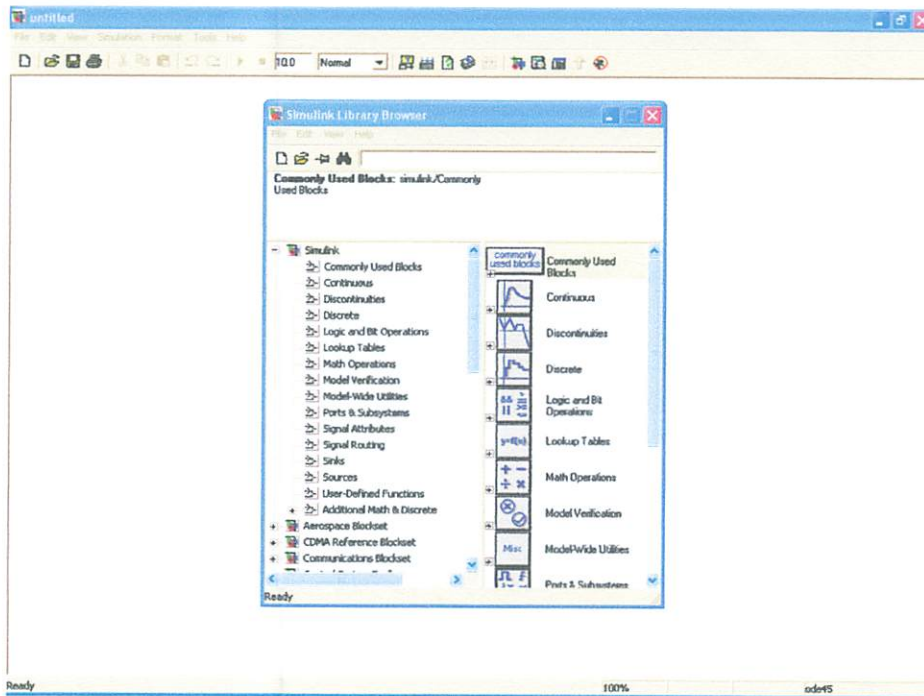
- MATLAB mempunyai dua pilihan, yaitu *Simulink* dan M-file, dimana masing – masing pilihan mempunyai fungsi – fungsi tersendiri. Di bawah ini merupakan tampilan lembar kerja dari Matlab M-file dan Simulink.

berikut adalah tampilan editor M-file yang terdapat pada *Software Matlab* versi 6.5



Gambar 3.2  
Tampilan Editor M-file

Sedangkan dibawah ini adalah gambar lembar kerja Matlab/Simulink editor dan *library*.



Gambar 3.3.  
Tampilan Editor *Simulink* dan *library*

Dalam makalah skripsi ini menggunakan Matlab editor M-file dalam menyelesaikan “ OPTIMASI PENEMPATAN *MULTI FACTS DEVICES* MENGGUNAKAN METODE *BREEDER GENETIC ALGORITHM (BGA)* UNTUK MEREDUKSI RUGI – RUGI DAYA PADA SALURAN TRANSMISI 150 kV UPT. MALANG ”.

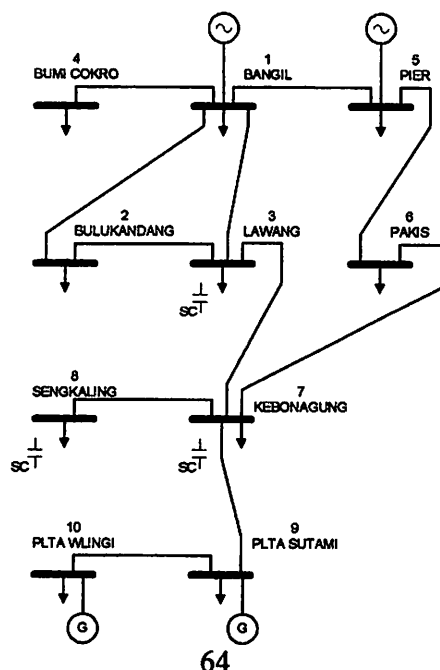
### 3.3 Data Lapangan PT.PLN (Persero) UPT Malang

Pada bab ini akan membahas tentang proses pengolahan data lapangan sebagai inputan, dimana data tersebut diperoleh dari survey pada PT.PLN (persero) P3B Region Jawa Timur khususnya UPT.Malang.

Proses pengolahan data lapangan dilakukan agar parameter yang digunakan dalam menganalisis performansi system tenaga listrik dengan *Software* matlab 6.5. dapat dilakukan. Data lapangan disini meliputi jumlah bus system transmisi 150kV UPT. Malang, tegangan pada masing – masing bus, pembebanan dan data saluran yang menghubungkan tiap-tiap bus, serta kompensasi terpasang yaitu kapasitor statis, sedangkan data yang dianalisis pada skripsi ini di titik beratkan pada pembebanan bulan juni 2007.

#### 3.3.1. Data Bus Transmisi 150kV

Pada wilayah kerja UPT.Malang mempunyai 10 bus transmisi 150kV, dimana wilayah kerja tersebut dapat digambarkan secara single line diagram berikut ini



### **3.3.2 Data Tegangan dan Pembebanan Bus**

Data tegangan yang diambil pada skripsi ini adalah tegangan bus pada gardu induk pada saat beroperasi, yaitu pada saat bus kondisi berbeban, sedangkan pembebanan bus adalah transformator daya 150/20 kV dan Inter bus Transformator 150/70 kV pada gardu induk

Table 3.1  
Data tegangan Bus Gardu Induk pada Bulan Juni 2007

TGL	BANGIL		PIER	BLKDNG	LWANG	KBAGUNG	SKLNG	WLINGI	SUTAMI	BMCKRO	PAKIS
	A	B									
1	149.4	149.4	149.4	148.4	148.6	146.5	141.1	143	141.5	150.5	147
2	148.9	148.9	148.6	147.6	147.8	145.2	145	145	140.3	150.3	146.2
3	147.8	147.8	147	146	146.8	144	144	145	139	149	144.6
4	146	146	146	145	145.2	143	142	144	138	147	143.6
5	146.5	146.5	147	149	144.9	142.2	142	142	137	147.6	144.6
6	146.8	146.8	146.5	145	144.8	141.9	142	141	136.6	17.6	144.1
7	148.1	148.1	147.6	146	146.6	143.8	142	143	139	149	145.2
8	147	147	146.8	145.7	146.6	143	137.7	141	139	149	144.4
9	148	148	147.8	146.8	146.6	144	139	144	139	149	145.4
10	149.9	149.9	150	149.2	149.6	146.5	140.9	145	141.1	150.8	147.6
11	148.4	148.4	147.6	146.6	147	144.1	138.6	143	139.9	149.2	145.2
12	148.6	148.6	148.6	147.3	147.8	145.2	146	144	140.3	149.7	146.2
13	146	146	146.2	145	145	143	143	142	138	147	143.8
14	147.6	147.6	148	147	146.5	143.8	144	140	139	148.9	145.4
15	147.1	147.1	148	146.5	145.7	143	143	139	138.2	147.6	145.4
16	147.6	147.6	147.3	146.5	147	144.4	144	139	140.3	148.6	144.7
17	147.6	147.6	146.8	146	147	144.4	139.3	143	140.3	149.5	144.2
18	147.4	147.4	147.5	146.2	147	144	138.8	142	139.4	148.2	144.9
19	146.5	146.5	146.2	145.4	148.5	143	138	139	138.5	147.3	143.6
20	145.2	145.2	144.6	143.3	143.6	141.1	135.7	142	136.6	145.7	142
21	148.9	148.9	148	148	147.8	145	145	146	141	149	145.4
22	147	147	147	145	146	143	143	142	138	148	144.4
23	146.5	146.5	146	145	145.2	142	143	142	138	148	143.4
24	146.5	146.5	146	145	145.2	142.5	143	142	138	147	143.4



25	145.2	144.6	143.7	144.2	141.4	138	142	137	145.5	142
26	147	146.8	145.7	146	143.5	144	140	138.8	147	144.2
27	147	146.8	145.2	146	143	137.2	140	138.8	148	144.2
28	147.1	147.6	146.2	146.8	143.7	139	141.7	139	148.4	145
29	146.8	146.5	145.2	145.4	142.5	143	143	138.5	147.6	143.9
30	146.8	146.5	146	145.4	142.5	143	142	137.1	147.6	143.9

MIN	145.2	0	144.6	143.3	143.6	141.1	135.7	139	136.6	145.5	142
MAX	149.9	0	150	149.2	149.6	146.5	146	146	141.5	150.8	147.6

Dari data yang diperoleh pada PT. PLN (persero) P3B Jawa-Bali, Region Jawa Timur dan Bali bahwa beban puncak pada bulan juni terjadi pada tanggal 14, sehingga studi aliran daya difokuskan pada kondisi tersebut.

Hal ini dilakukan agar tercapai suatu kondisi dimana transmisi 150 kV bekerja pada pembebanan yang maksimal, sehingga dapat diketahui unjuk kerja dari system transmisi tersebut.

Tabel 3.2  
Data Pembebanan Bus Gardu Induk pada tanggal 14 juni 2007

Gardu Induk	Tegangan (kV)	Pembebanan		Genererator		Injeksi (Mvar)
		MW	Mvar	(MW)	(Mvar)	
BANGIL (A)	147.6	80.2	32	-	-	-
BANGIL (B)	0	0	0	-	-	-
PIER	148	15.6	4.7	-	-	-
BLKNDNG	147	9	2.8	-	-	-
LAWANG	146.5	22.7	7.0	-	-	25
KB AGUNG	143.8	122.8	59.2	-	-	25
SNGKLING	144	57.3	32.8	-	-	25
SUTAMI	139	0.15	0	75	32.3	-
WLINGI	140	36.6	36.4	20	5.1	-
BM COKRO	148.9	28.1	9.4	-	-	-
PAKIS	145.4	18.7	6.2	-	-	-

Sumber : PT.PLN (PERSERO) P3B REGION JAWATIMUR & BALI

### 3.3. Data Saluran Transmisi

Table 3.3  
Data penghantar terpasang pada saluran transmisi 150kV UPT Malang

Jml sirkuit	Dari	Ke	No Sirkuit	Data Penghantar			I Nom (Amp)	
				Teg (kV)	Jarak (Km)	Jenis		
1	KBAGN5	LWANG5	1	150	25.805	ACSR. AW	330 m2	740
1	KBAGN5	LWANG5	2	150	25.805	ACSR. AW	330 m2	740
1	KBAGN5	SKLING5	1	150	15.100	ACSR. HAWK	477 MCM	600
1	KBAGN5	SKLING5	2	150	15.100	ACSR. HAWK	477 MCM	600
1	KBAGN5	PAKIS5	1	150	12.900	ACSR. ZEBRAHAWK	2 x 435 m2	1600
1	KBAGN5	PAKIS5	2	150	12.900	ACSR. ZEBRAHAWK	2 x 435 m2	1600
1	KBAGN5	STAMI5	1	150	27.950	ACSR. AW	330 m2	740
1	KBAGN5	STAMI5	2	150	27.950	ACSR. AW	330 m2	740
1	STAMI5	WLNGI5	1	150	23.600	ACSR	160 m2	435
1	LWANG5	BNGIL5	1	150	34.680	ACSR. AW	330 m2	740
1	BNGIL5	LWANG5	1	150	34.680	ACSR. AW	330 m2	740
1	BNGIL5	BLKDN5	1	150	27.770	ACSR. AW	330 m2	740
1	BNGIL5	PIER5	1	150	5.150	ACSR. ZEBRA	2 x 435 m2	1620
1	BNGIL5	PIER5	2	150	5.150	ACSR. ZEBRA	2 x 435 m2	1620
1	PAKIS5	PIER5	1	150	52.507	ACSR. ZEBRA	2 x 435 m2	1620
1	PAKIS5	PIER5	2	150	52.507	ACSR. ZEBRA	2 x 435 m2	1620
1	BNGIL5	BCKRO5	1	150	6.200	ACSR. ZEBRA	2 x 435 m2	1620
1	BNGIL5	BCKRO5	2	150	6.200	ACSR. ZEBRA	2 x 435 m2	1620

Sumber : PT.PLN (PERSERO) P3B REGION JAWA TIMUR & BALI

Table 3.4  
Data Impedansi Penghantar Pada Transmisi 150kV UPT Malang

Jml sirkuit	Dari	Ke	No Sirkuit	Data Penghantar		R (Ohm/km)	X (Ohm/km)
				Teg (kV)	Jarak (Km)		
1	KBAGN5	LWANG5	1	150	25.805	0.1172	0.4003
1	KBAGN5	LWANG5	2	150	25.805	0.1172	0.4003
1	KBAGN5	SKLING5	1	150	15.100	0.1370	0.3966
1	KBAGN5	SKLING5	2	150	15.100	0.1370	0.3966
1	KBAGN5	PAKIS5	1	150	12.900	0.0387	0.2807
1	KBAGN5	PAKIS5	2	150	12.900	0.0387	0.2807
1	KBAGN5	STAMI5	1	150	27.950	0.1172	0.4003
1	KBAGN5	STAMI5	2	150	27.950	0.1172	0.4003
1	STAMI5	WLNGI5	1	150	23.600	0.2136	0.4080
1	LWANG5	BNGIL5	1	150	34.680	0.1172	0.4003
1	BNGIL5	LWANG5	1	150	34.680	0.1172	0.4003
1	BNGIL5	BLKDN5	1	150	27.770	0.1172	0.4003
1	BNGIL5	PIER5	1	150	5.150	0.3870	0.2807
1	BNGIL5	PIER5	2	150	5.150	0.3870	0.2807
1	PAKIS5	PIER5	1	150	52.507	0.3870	0.2807
1	PAKIS5	PIER5	2	150	52.507	0.3870	0.2807
1	BNGIL5	BCKRO5	1	150	6.200	0.3870	0.2807
1	BNGIL5	BCKRO5	2	150	6.200	0.3870	0.2807

Sumber : PT.PLN (PERSERO) P3B REGION JAWATIMUR & BALI

Dari table di atas maka dapat dihitung nilai impedansi saluran per-unit menjadi : [3]

$$Z_{act} = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{(0.1172)^2 + (0.4003)^2} = 0.4173 \Omega$$

$$Z_{base} = \frac{KV^2}{100MVA} = \frac{(150)^2 KV}{100MVA} = 225 \Omega$$

$$Z_{pu} = \frac{Z_{act}}{Z_{base}} = \frac{0.4173}{225} = 0.00185 pu$$

Untuk nilai resistansi saluran yang menghubungkan tiap – tiap bus dengan rumusan sebagai berikut. [3]

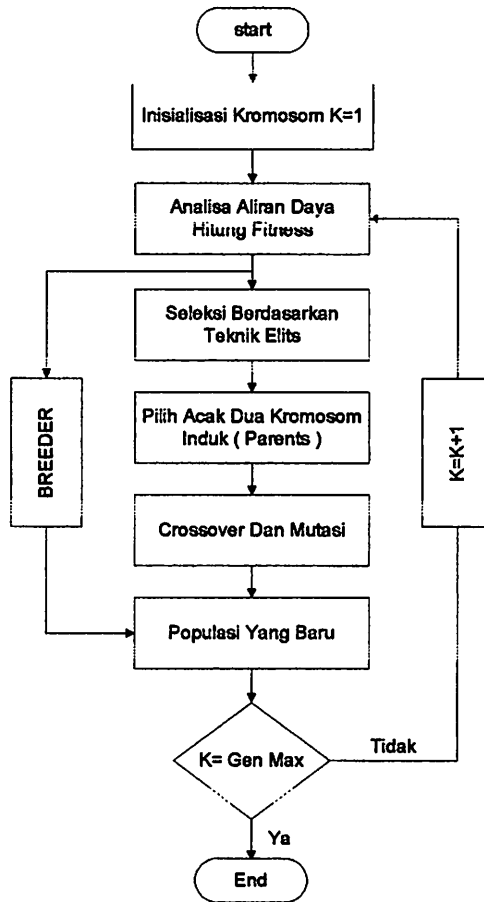
$$R_{O_{pu}} = \frac{RX \text{ jarak(km)}}{Z_{base}} = \frac{0.1172 \times 25.805}{225} = 0.0134 pu$$

Untuk nilai reaktansi saluran yang menghubungkan tiap – tiap bus adalah dengan rumusan sebagai berikut.<sup>[3]</sup>

$$X_{o_{pu}} = \frac{X \times \text{jarak}(km)}{Z_{base}} = \frac{0.4003 \times 25.805}{225} = 0.0459$$

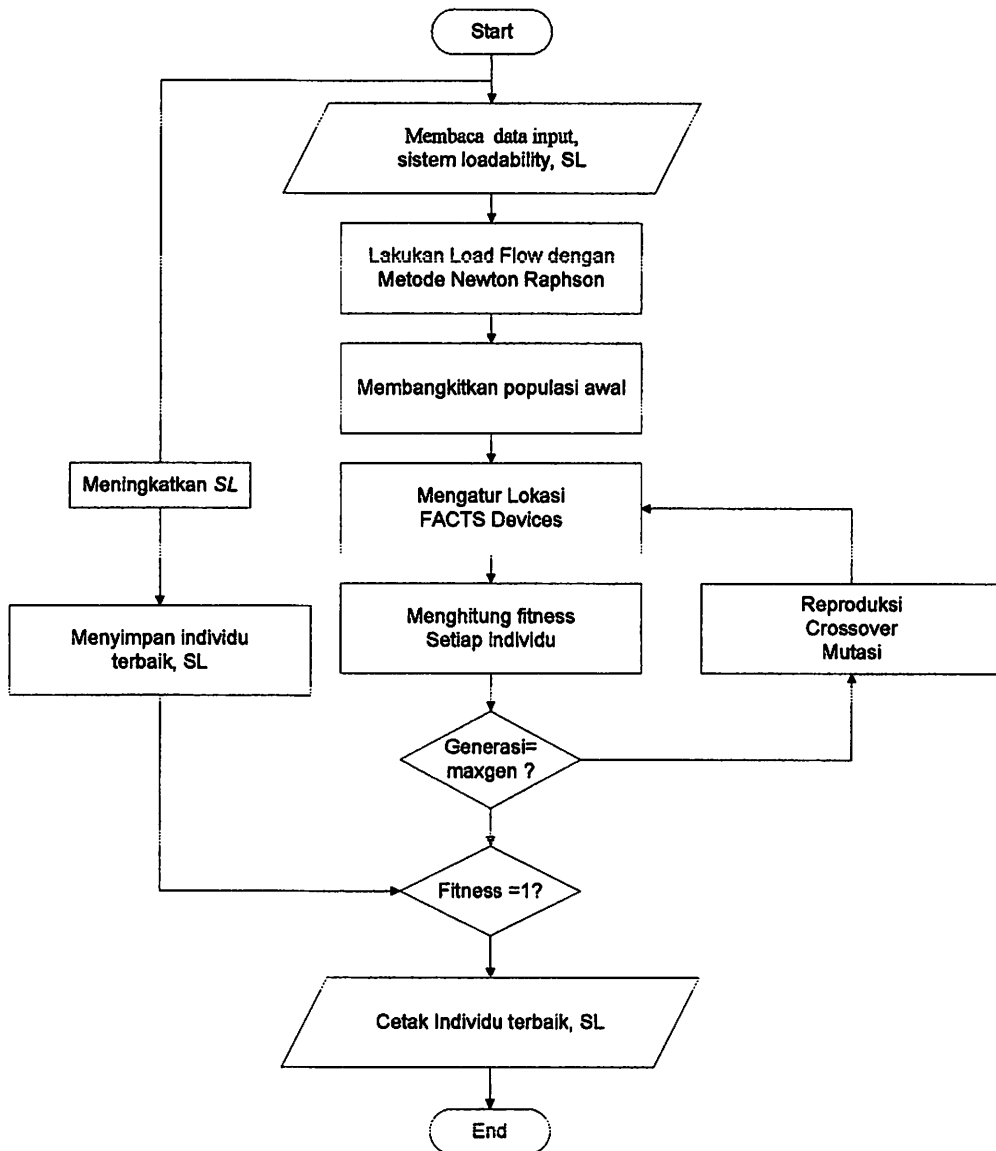
Sedangkan nilai kapasitansi saluran yang menghubungkan tiap – tiap bus diabaikan, karena system tergolong pada saluran pendek dalam klasifikasi saluran transmisi. Klasifikasi saluran transmisi mendasari besar kecilnya kapasitansi ke tanah. bahwa kapasitansi kecil, dengan demikian arus bocor ke tanah kecil terhadap arus beban, maka dalam hal ini kapasitansi ke tanah dapat diabaikan . saluran transmisi di klasifikasi saluran pendek apabila jarak antar bus kurang dari 80 km<sup>[9]</sup>.

### 3.5. Flowchart Breeder Genetic Algorithm



Gambar 3.4  
Breeder Genetic Algorithm

### 3.6. Flowchart optimasi penentuan *FACTS*



Gambar 3.5 Strategi Optimasi

## **BAB IV**

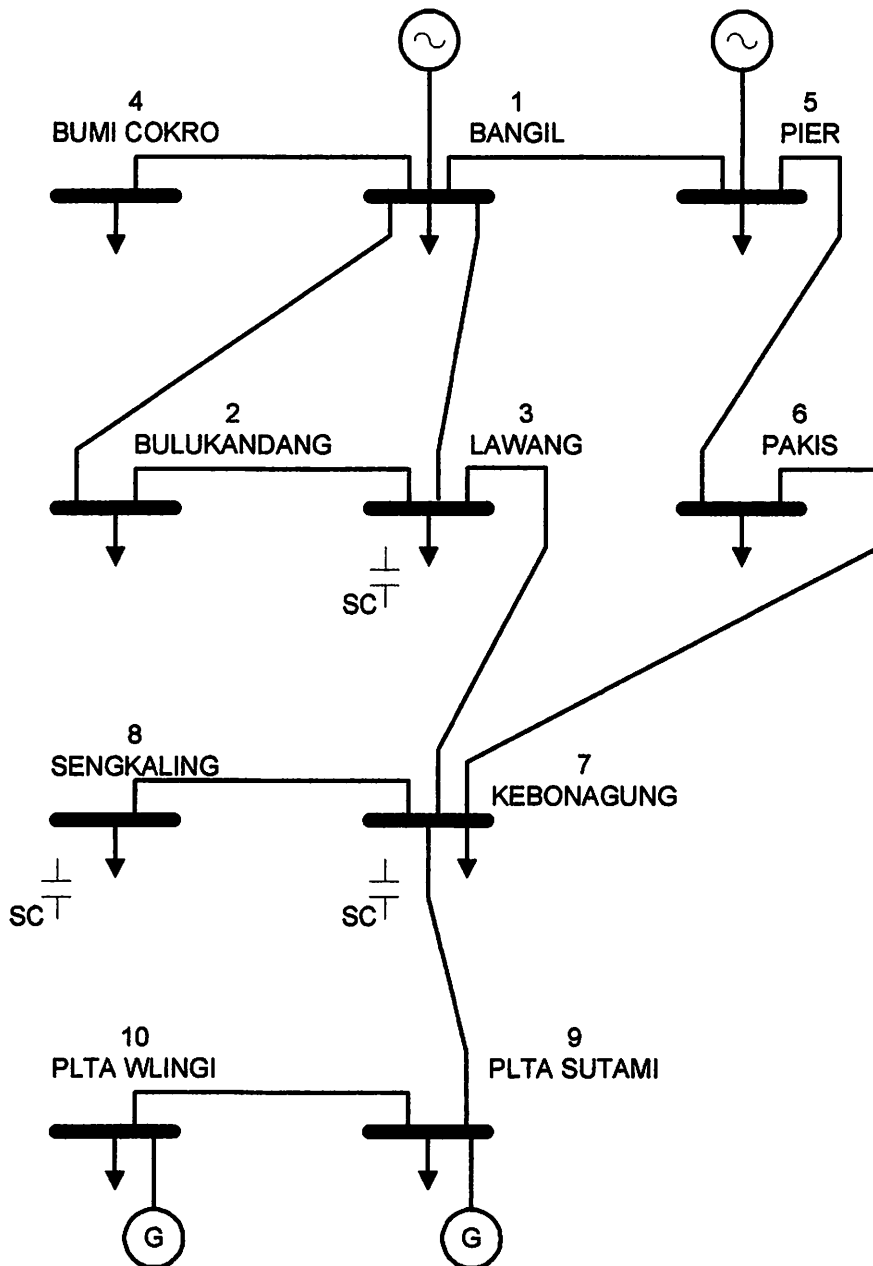
### **SIMULASI DAN ANALISA**

#### **4.1. single line Transmisi 150kV UPT. Malang**

Perkembangan industri dan meningkatnya kebutuhan akan ketersediaan energi listrik yang baik khususnya di wilayah malang sangatlah pesat, tapi hal ini tidak didukung oleh penyediaan sumber energi listrik yang memadai. Dengan sumber daya energi yang terbatas, dalam hal ini PLN dituntut untuk memberikan pelayanan yang optimal dalam penyaluran energi listrik. Salah satu caranya adalah dengan memaksimalkan kualitas transfer daya dari Gardu Induk satu dengan yang lain dengan cara mereduksi rugi – rugi daya yang ada pada saluran atau sistem. Maka akan akan diperoleh daya transfer yang optimal serta handal dalam kebutuhan sehari – hari. Dengan adanya kehandalan suatu sistem transfer tenaga listrik dari gardu induk satu dengan yang lain maka efisiensi dari pembangkitan akan naik atau dengan kata lain rugi – rugi daya dalam suatu sistem dapat direduksi semaksimal.



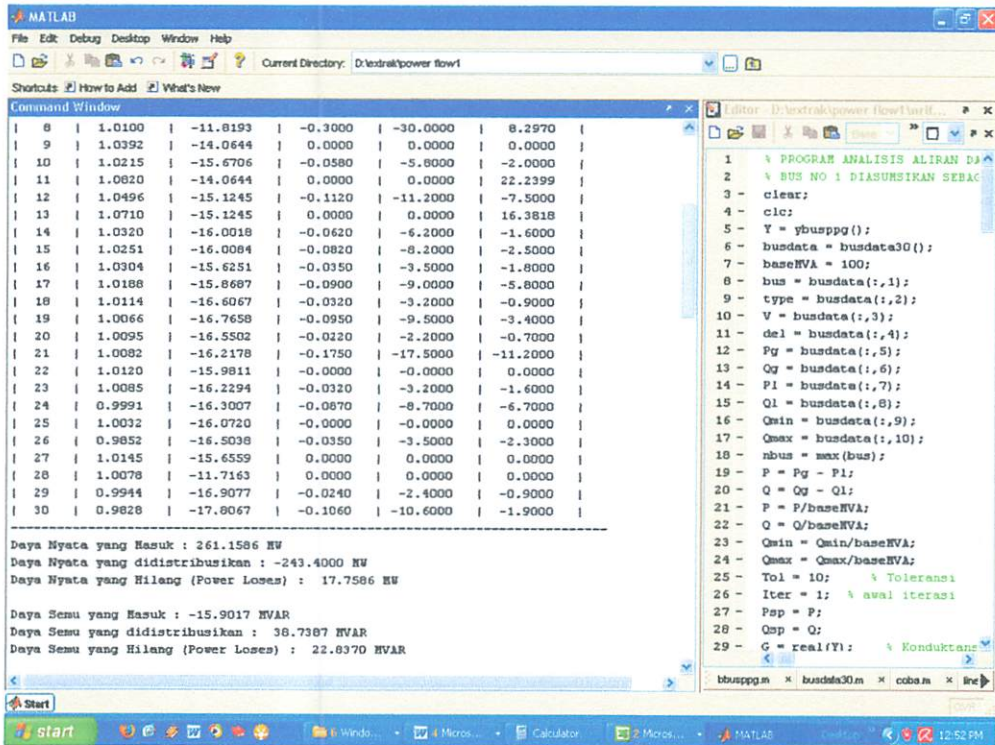
## 4.2 Gambar Singel Line Diagram.



Gambar 4.1  
Singel Line Saluran Transmisi 150kV UPT Malang.

## Validasi program

Berikut aplikasi program dengan data dari buku *POWER ANALYSIS* karangan profesor Hadi Saadat, yaitu membandingkan hasil tertulis pada buku dengan hasil penyelesaian progra matlab 6.5



Gambar 4.2  
Hasil load flow dengan software matlab

Setelah dilakukan uji validasi program ternyata terdapat kemiripan rugi – rugi daya antara hasil tertulis di buku dengan hasil program matlab 6.5 sehingga program layak digunakan sebagai analisis.

### 4.3 Hasil Analisa

#### 4.3.1. Hasil Analisa Aliran Daya Sebelum di *inject*.

Dibawah ini adalah hasil analisa aliran daya jaringan transmisi 150 kV UPT. Malang dengan menggunakan metode *Newton*

*Rhapson* sebelum optimasi.

Parameter BGA

Ukuran Populasi : 20

Maksimum Generasi : 10

Tabel 4.1 Hasil *Load Flow* sebelum optimasi

----- Newton Raphson Loadflow Analysis Sebelum Diinject -----											
Bus	V	Angle	PQBUS		PQREC		PQSEND		PQLOSS		
			MW	MVar	MW	Mvar	MW	MVar	MW	MVar	
No	pu	Degree									
1	1.0000	0.0000	0.941	15.897	27.942	9.969	-27.424	-9.648	0.518	0.321	
2	0.9799	-0.2520	15.600	4.700	28.196	10.094	-28.100	-9.400	0.096	0.694	
3	0.9894	-1.2007	28.100	9.400	9.013	2.844	-9.000	-2.800	0.013	0.044	
4	0.9973	-0.2322	9.000	2.800	14.108	-6.203	-13.679	6.350	0.429	0.147	
5	0.9785	-1.1659	22.700	7.000	11.824	4.948	-10.814	-3.587	1.010	1.361	
6	0.8711	-4.6091	18.700	6.200	-9.021	-13.350	9.057	13.474	0.036	0.124	
7	0.9861	-1.0265	122.800	59.200	-7.886	-2.613	8.725	3.510	0.839	0.897	
8	0.9745	-1.7876	57.300	32.800	57.536	33.958	-57.300	-32.800	0.236	1.158	
9	1.0000	0.0000	-141.988	-86.782	-198.118	-110.142	198.888	115.282	0.769	5.140	
10	1.0000	0.0000	69.600	36.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Total			202.754	87.615	-66.407	-70.495	70.353	80.380	3.946	9.885	

### 4.3. Hasil Analisa Optimasi Menggunakan *FACTS DEVICE* ( *TCSC* )

Di bawah ini adalah hasil optimasi *FACTS DEVICE* dengan menggunakan 3 buah *TCSC*

Parameter BGA  
 Ukuran Populasi : 20  
 Maksimum Generasi : 10

Tabel 4.2 Hasil *Load Flow* Menggunakan 3 buah *TCSC*

-----  
 -----  
 Newton Raphson Loadflow Analysis Setelah Diinject 3 buah *TCSC*  
 -----  
 -----

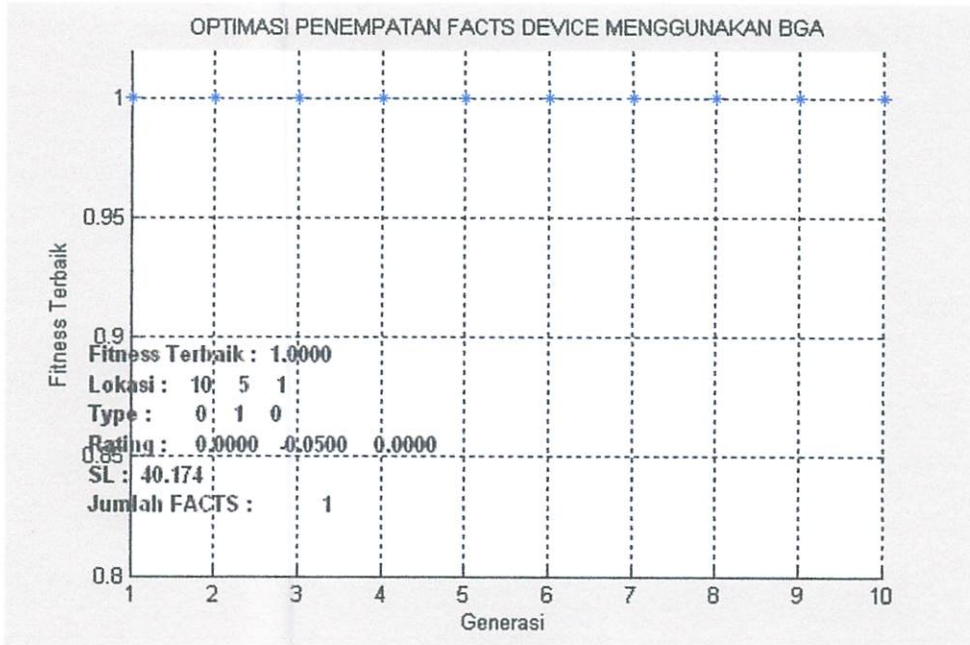
Bus   No	V   pu	Angle   Degree	PQBUS		PQREC		PQSEND		PQLOSS	
			MW	MVar	MW	Mvar	MW	MVar	MW	MVar
1	1.0000	0.0000	-6.816	16.170	36.043	9.437	-35.226	-8.931	0.817	0.506
2	0.9754	-0.4449	36.600	8.230	28.196	10.094	-28.100	-9.400	0.096	0.694
3	0.9894	-1.2007	28.100	9.400	9.013	2.844	-9.000	-2.800	0.013	0.044
4	0.9973	-0.2322	9.000	2.800	13.764	-5.945	-13.358	6.084	0.406	0.139
5	0.9790	-1.1256	22.700	7.000	-1.374	0.701	1.389	-0.681	0.015	0.020
6	0.9781	0.4601	-2.300	2.328	-9.342	-13.084	9.378	13.207	0.036	0.124
7	0.9864	-0.9755	122.800	59.200	0.911	-1.647	-0.877	1.683	0.034	0.037
8	0.9748	-1.7360	57.300	32.800	57.536	33.957	-57.300	-32.800	0.236	1.157
9	1.0000	0.0000	-132.645	-84.278	-188.837	-108.047	189.545	112.778	0.708	4.731
10	1.0000	0.0000	69.600	36.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			204.339	90.050	-54.089	-71.689	56.450	79.140	2.361	7.450

-----  
 -----

elapsed\_time =

56.0790

Di bawah ini adalah gambar hasil dari optimasi dengan menggunakan 3 buah TCSC, dimana nilai SL meningkat 40,174 yaitu losses pada saluran dapat direduksi sebesar 1,585 MW dari 3,946 MW menjadi 2.361 MW dan daya reaktif sebesar 2.435 MVar dari 9,885 Mvar menjadi 7,450 Mvar. Dimana nilai SL dan lokasi pemasangan ditunjukkan pada gambar di bawah ini



Gambar 4.3  
 Hasil dari Optimasi dengan 3 buah TCSC

#### 4.4. Hasil Analisa Optimasi Menggunakan *FACTS DEVICE (SVC)*

Di bawah ini adalah hasil optimasi *FACTS DEVICE* dengan menggunakan 3 buah *SVC*

Parameter BGA

Ukuran Populasi : 20

Maksimum Generasi : 10

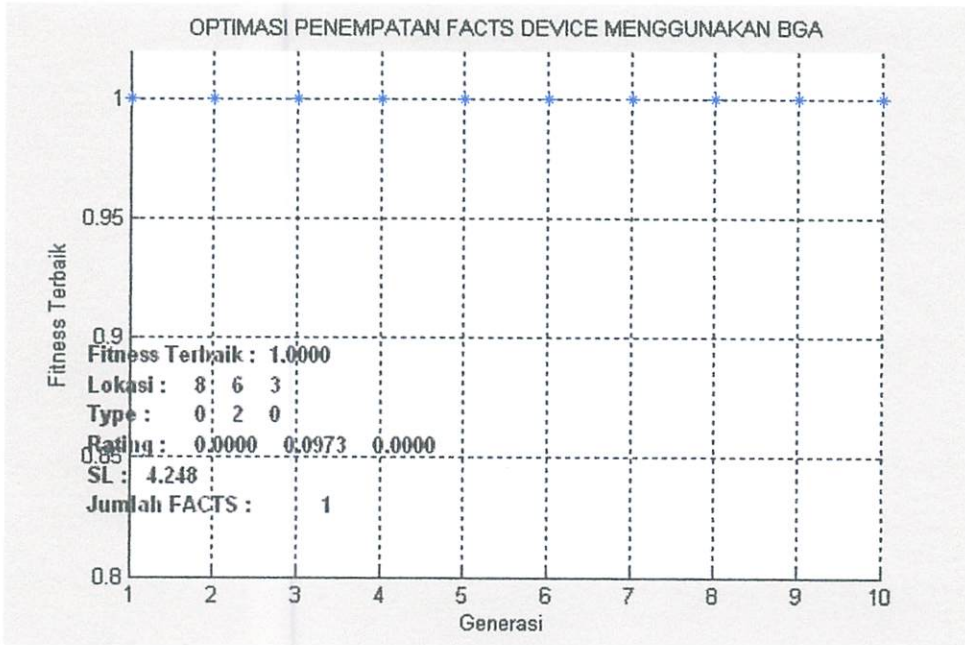
Tabel 4.2 Hasil *Load Flow* Menggunakan 3 buah *SVC*

Bus	V	Angle	PQBUS		PQREC		PQSEND		PQLOSS	
			MW	MVar	MW	Mvar	MW	MVar	MW	MVar
1	1.0000	0.0000	0.898	25.017	28.235	1.025	-27.765	-0.734	0.470	0.291
2	0.9831	-0.5643	15.600	4.700	28.196	10.094	-28.100	-9.400	0.096	0.694
3	0.9894	-1.2007	28.100	9.400	9.013	2.844	-9.000	-2.800	0.013	0.044
4	0.9973	-0.2322	9.000	2.800	13.858	-6.380	-13.438	6.523	0.420	0.144
5	0.9791	-1.1748	22.700	7.000	12.165	-3.966	-11.165	5.313	1.000	1.348
6	0.9500	-7.9581	18.700	-9.516	-9.262	-13.523	9.300	13.652	0.038	0.129
7	0.9867	-1.0305	122.800	59.200	-7.535	4.203	8.296	-3.390	0.761	0.813
8	0.9751	-1.7905	57.300	32.800	57.536	33.956	-57.300	-32.800	0.236	1.156
9	1.0000	0.0000	-141.777	-79.900	-197.931	-103.418	198.677	108.400	0.746	4.982
10	1.0000	0.0000	69.600	36.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			202.921	87.900	-65.727	-75.166	69.505	84.765	3.779	9.600

elapsed\_time =

24.9840

Di bawah ini adalah gambar hasil dari optimasi dengan menggunakan 3 buah SVC, dimana nilai SL meningkat 4,248 yaitu losses pada saluran dapat direduksi sebesar 0,167 MW dari 3,946 MW menjadi 3,779 MW dan daya reaktif sebesar 0,285 MVar dari 9,885 Mvar menjadi 9,600 Mvar. Dimana nilai SL dan lokasi pemasangan ditunjukkan pada gambar di bawah ini



Gambar 4.4  
Hasil dari Optimasi dengan 3 buah SVC

#### 4.5. Hasil Analisa Optimasi Menggunakan *FACTS DEVICE* ( *TCSC* dan *SVC* )

Di bawah ini adalah hasil optimasi *FACTS DEVICE* dengan gabungan *TCSC* dan *SVC*

Parameter BGA

Ukuran Populasi : 20

Maksimum Generasi : 10

Tabel 4.2 Hasil Load Flow Menggunakan *TCSC* dan *CVC*

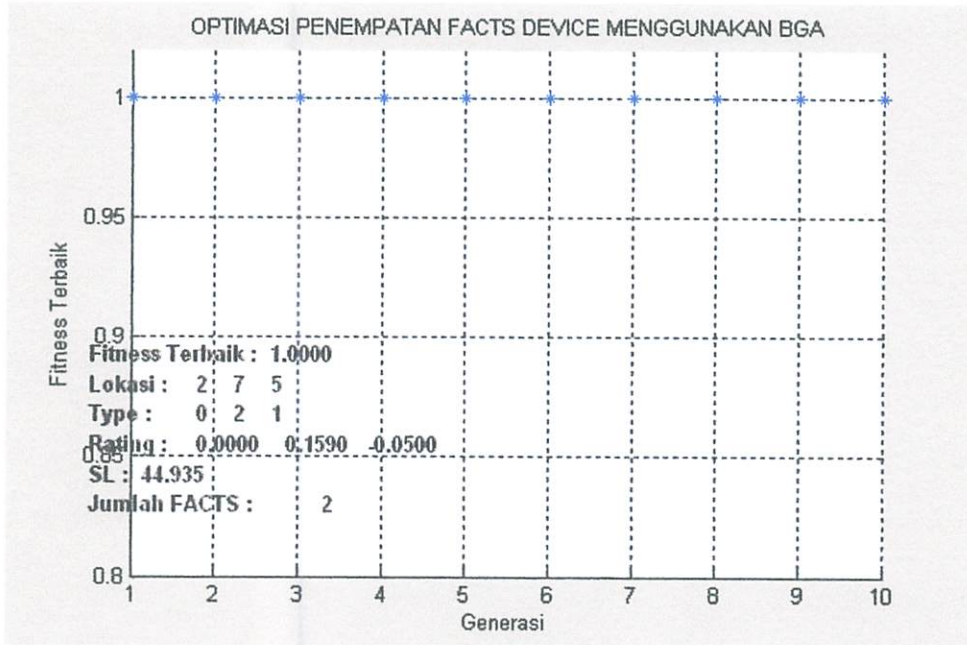
Bus   No	V   pu	Angle   Degree	PQBUS		PQREC		PQSEND		PQLOSS	
			MW	MVar	MW	Mvar	MW	MVar	MW	MVar
1	1.0000	0.0000	-1.654	21.196	35.711	8.320	-34.919	-7.830	0.791	0.490
2	0.9760	-0.4762	36.600	6.828	28.196	10.094	-28.100	-9.400	0.096	0.694
3	0.9894	-1.2007	28.100	9.400	9.013	2.844	-9.000	-2.800	0.013	0.044
4	0.9973	-0.2322	9.000	2.800	8.934	-9.853	-8.615	9.962	0.320	0.109
5	0.9902	-1.3490	22.700	7.000	-1.681	1.002	1.704	-0.970	0.024	0.032
6	0.9782	0.6811	-2.300	3.642	-14.085	-16.962	14.152	17.190	0.067	0.228
7	1.0000	-1.1067	122.800	-84.816	0.596	-2.673	-0.523	2.750	0.072	0.077
8	0.9886	-1.8465	57.300	32.800	57.529	33.925	-57.300	-32.800	0.229	1.125
9	1.0000	0.0000	-137.619	55.700	-193.958	30.952	194.519	-27.200	0.562	3.752
10	1.0000	0.0000	69.600	36.400	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			204.527	90.950	-69.745	57.648	71.918	-51.097	2.173	6.550

elapsed\_time =

75.0930



Di bawah ini adalah gambar hasil dari optimasi dengan menggunakan TCSC dan SVC, dimana nilai SL meningkat 44,935 yaitu losses pada saluran dapat direduksi sebesar 1,773 MW dari 3,946 MW menjadi 2.173 MW dan daya reaktif sebesar 3,335 MVar dari 9,885 Mvar menjadi 6,550 Mvar. Dimana nilai SL dan lokasi pemasangan ditunjukkan pada gambar di bawah ini



Gambar 4.5  
 Hasil dari Optimasi dengan TCSC dan SVC

## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1. Kesimpulan

Pada ketiga macam kasus yang telah di simulasikan maka dapat disimpulkan bahwa pada simulai *Multi Type FACTS device* ( TCSC dan SVC ) lebih optimal di bandingkan dengan *Singel Type FACTS device* ( TCSC atau SVC )

1. Dengan menggunakan *Multi FACTS device* dapat mereduksi rugi – rugi daya sebesar 1,773 MW, dari rugi – rugi daya dalam sistem sebesar 3,946 MW menjadi 2,173 MW atau mereduksi sebesar 44,935 %. dan daya reaktif sebesar 3,335 MVar dari 9,885 MVar menjadi 6,550 MVar atau mereduksi sebesar 33,73 %.
2. Pada percobaan *Singel type FACTS device*(TCSC) mampu mereduksi rugi – rugi daya sebesar ,585 MW dari 3,946 MW menjadi 2.361 MW atau mereduksi sebesar 40,174 %. dan daya reaktif sebesar 2.435 MVar dari 9,885 MVar menjadi 7,450 MVar atau mereduksi sebesar 41,06 %.
3. Pada percobaan *Singel type FACTS device*(SVC) mampu mereduksi rugi – rugi daya sebesar 0,167 MW dari 3,946 MW menjadi 3,779 MW, atau mereduksi sebesar 4,248 % . dan daya reaktif sebesar 0,285 MVar dari 9,885 Mvar menjadi 9,600 Mvar atau mereduksi sebesar 2,88 %.

## **5.2. Saran**

Untuk sikripsi ini diharapkan untuk metode Bredeer Genetic Algorithm dan Newton Rapshon untuk menghitung Load Flow dapat secara On Line, sehingga dapat dipantau dari jarak jauh.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suhadi Tri Wrahatnolo “ *Teknik Distriusi Tenaga Listrik* “ , Penerbit Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan jilid 1, 2008.
- [2] Stevenson, William D, Jr, “*Analisis Sistem Tenaga Elektrik*” , Penerbit Erlangga edisi keempat, 1996.
- [3] John Wiley & Sons “ *FACTS Modelling And Simulation In Power Network*“
- [4] Hadi Saadat, “*Power System Analysis*”, McGraw-Hill.
- [5] Hingorani, N. G., and Gyugyi, L. 2001, Understanding FACTS: “*Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*”, New York: IEEE Press.
- [6] Umar , Adi Soeprijanto , Mauridhi Hery Purnomo “*Optimasi Penempatan Multi Facts Devices Pada Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan Menggunakan Algoritma Genetika*”.

**LAMPIRAN**



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1  
Jl. Karanglo km 2, Malang

## BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

Nama : Fauzi Hamzah Nasution  
NIM : 05.12.021  
Jurusan : Teknik Elektro S-1  
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik  
Judul Skripsi : OPTIMASI PENEMPATAN MULTI FACTS DEVICE  
MENGUNAKAN METODE BREEDER GENETIC  
ALGORITHM (BGA) UNTUK MEREDUKSI RUGI – RUGI  
DAYA PADA SALURAN TRANSMISI 150 kV UPT.  
MALANG.

Dipertahankan di hadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1) pada :  
Hari : Rabu  
Tanggal : 10 Februari 2010  
Dengan Nilai : 86,3475 ( A ) *By*

### Panitia Ujian Skripsi

#### Ketua Majelis Penguji

Ir. H. Sidik Noertjahjono, MT.  
NIP.Y.102.8700.163

#### Sekretaris Majelis Penguji

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT.  
NIP.Y.103.9500.274

### Anggota Penguji

#### Penguji I

Ir. Eko Nurcahyo  
NIP.Y.1028700172

#### Penguji II

Ir. M. Abdul Hamid, MT.  
NIP.Y.1018800188

## PROGRAM OPTIMASI

```
clc;
clear all;
disp('Pilihan jenis Facts Device');
disp('1 : TCSC saja');
disp('2 : SVC saja');
disp('3 : Kombinasi antara TCSC dan SVC');
Macam=input('Pilihan Anda : ');
nFacts=input('Banyaknya FACTS yang digunakan : ');
fprintf('\n');
disp('Parameter BGA');
UkPop=input('Ukuran Populasi : ');      %Ukuran populasi
MaxGen=input('Maksimum Generasi : ');    %maksimum generasi
Psilang=0.9;      %Peluang Pindah Silang
PmutX=0.000005;  %Peluang Mutasi Lokasi
PmutY=0.000005;  %Peluang Mutasi Type
PmutZ=0.000005;  %Peluang Mutasi rating

tic
nBus=10;      %banyaknya Bus
nLine=10;     %Banyaknya Saluran
Bf=0.25;     %Batas atas figure
SL=1;        %Inisialisasi Sistem Loadability
ulang=0;
coba=0;

%Inisialisasi Grafis
hfig=figure;
hold on
title('OPTIMASI PENEMPATAN FACTS DEVICE MENGGUNAKAN BGA');
set(hfig,'Position',[250,200,600,400]);
set(hfig,'DoubleBuffer','on');
axis([1 MaxGen 0.8 1.02]);
hbestplot = plot(1:MaxGen,zeros(1,MaxGen),'*');
htext1 = text(0.05*MaxGen,0.45*Bf+0.78,sprintf('Fitness Terbaik : %7.4f',
0.0),'FontWeight','bold');
htext2 = text(0.05*MaxGen,0.40*Bf+0.78,sprintf('Lokasi : '), 'FontWeight','bold');
htext21 = text(0.15*MaxGen,0.40*Bf+0.78,sprintf('%5.4f',
0.0),'FontWeight','bold');
htext3 = text(0.05*MaxGen,0.35*Bf+0.78,sprintf('Type : '), 'FontWeight','bold');
htext31 = text(0.15*MaxGen,0.35*Bf+0.78,sprintf('%5.4f',
0.0),'FontWeight','bold');
htext4 = text(0.05*MaxGen,0.30*Bf+0.78,sprintf('Rating : '), 'FontWeight','bold');
htext41 = text(0.15*MaxGen,0.30*Bf+0.78,sprintf('%5.4f',
0.0),'FontWeight','bold');
htext6 = text(0.05*MaxGen,0.25*Bf+0.78,sprintf('SL : '), 'FontWeight','bold');
```

Jl. B. Sutarni 8 Kav. 8 (0341) 567216 Jl. Raya Tidar / B

```

htext7 = text(0.05*MaxGen,0.20*Bf+0.78,sprintf('Jumlah FACTS :
'),'FontWeight','bold');
htext71 = text(0.3*MaxGen,0.20*Bf+0.78,sprintf('%7.4f',
0.0),'FontWeight','bold');
xlabel('Generasi');
ylabel('Fitness Terbaik');
hold off
drawnow;

%Mendapatkan Power Loss awal
awal_x = fix(random('unif',1,nLine+1,1,nFacts));
awal_y = zeros(1,nFacts);
awal_z = random('unif',-1,1,1,nFacts);

[Fitness,VM,VA,Pbus,Qbus,Psend,Qsend,Prec,Qrec,Ploss,Qloss,nilai] =
fungsi(awal_x,awal_y,awal_z,nFacts,nBus);
fprintf('\n');

disp('-----');
disp('');
disp(' Newton Raphson Loadflow Analysis Sebelum Diinject');
disp('-----');
disp('');
disp('| Bus | V | Angle | PQBUS | PQREC | PQSEND
| PLOSS |');
disp('| No | pu | Degree | MW | MVar | MW | Mvar | MW |
MVar | MW | MVar |');
disp('-----');
disp('');
for m = 1:nBus
    fprintf('%3g', m); fprintf(' %8.4f, VM(m)); fprintf(' %8.4f, VA(m));
    fprintf(' %8.3f, Pbus(m)); fprintf(' %8.3f, Qbus(m));
    fprintf(' %8.3f, Psend(m)); fprintf(' %8.3f, Qsend(m));
    fprintf(' %8.3f, Prec(m)); fprintf(' %8.3f, Qrec(m));
    fprintf(' %8.3f, Ploss(m)); fprintf(' %8.3f, Qloss(m));fprintf('\n');
end
disp('-----');
disp('');
fprintf(' Total ');fprintf(' %8.3f, sum(Pbus)); fprintf(' %8.3f,
sum(Qbus));
fprintf(' %8.3f, sum(Psend)); fprintf(' %8.3f, sum(Qsend));
fprintf(' %8.3f, sum(Prec)); fprintf(' %8.3f, sum(Qrec));
fprintf(' %8.3f, sum(Ploss)); fprintf(' %8.3f, sum(Qloss));fprintf('\n');
disp('-----');
disp('');
pause

```



```

fprintf('\n');
fprintf('\n');
PLoss_awal = sum(Ploss);
QLoss_awal = sum(Qloss);
PLo=PLoss_awal;
QLo=QLoss_awal;

%Inisialisasi Nilai terbaik
terFit=zeros(1,MaxGen);
fterbaik=zeros(1,MaxGen);
terY=fix(3*rand(1,nFacts));
terX=fix(random('unif',1,nLine+1,1,nFacts));
terZ=random('unif',-1,1,1,nFacts);

MaxF=1;
while MaxF==1,
    %Inisialisasi Populasi
    populasiZ=inisialZ(nFacts,UkPop);
    populasiY=inisialY(nFacts,UkPop,Macam);
    populasiX=inisialX(nFacts,UkPop,nBus,nLine,populasiY);

    %Looping iterasi
    for Generasi=1:MaxGen
        x=populasiX(1,:);
        y=populasiY(1,:);
        z=rating(nFacts,populasiZ(1,:),y);
        [Fitness,VM,VA,Pbus,Qbus,Psend,Qsend,Prec,Qrec,Ploss,Qloss,nilai] =
fungsi(x,y,z,nFacts,nBus);
        BestV = VM;
        BestDel = VA;
        BestP = Pbus;
        BestQ = Qbus;
        BestPsend = Psend;
        BestQsend = Qsend;
        BestPrec = Prec;
        BestQrec = Qrec;
        BestPloss = Ploss;
        BestQLoss = Qloss;
        PLoss = sum(Ploss);
        QLoss = sum(Qloss);
        BestX = x;
        BestY = y;
        BestZ = nilai;
        MaxF = Fitness(1);
        MinF = Fitness(1);
        IndeksIndividuTerbaik = 1;
    end
end

```

```

for ii=2:UkPop
    x=populasiX(ii,:);
    y=populasiY(ii,:);
    z=rating(nFacts,populasiZ(ii,:),y);
    [Fitness(ii),VM,VA,Pbus,Qbus,Psend,Qsend,Prec,Qrec,Ploss,Qloss,nilai] =
fungsi(x,y,z,nFacts,nBus);
    if (Fitness(ii) > MaxF),
        MaxF= Fitness(ii);
        IndeksIndividuTerbaik=ii;
        BestV = VM;
        BestDel = VA;
        BestP = Pbus;
        BestQ = Qbus;
        BestPsend = Psend;
        BestQsend = Qsend;
        BestPrec = Prec;
        BestQrec = Qrec;
        BestPloss = Ploss;
        BestQloss = Qloss;
        Ploss = sum(Ploss);
        Qloss = sum(Qloss);
        BestX = x;
        BestY = y;
        BestZ = nilai;
    end
    if (Fitness(ii) < MinF),
        MinF = Fitness(ii);
    end
end
%Penyimpanan nilai fitenss terbaik
terFit(1,Generasi)=MaxF;

%Ellitisme
TemPopulasiX = populasiX;
TemPopulasiY = populasiY;
TemPopulasiZ = populasiZ;
if mod (UkPop, 2) ==0
    IterasiMulai = 3;
    TemPopulasiX(1,:) = populasiX(IndeksIndividuTerbaik,:);
    TemPopulasiY(1,:) = populasiY(IndeksIndividuTerbaik,:);
    TemPopulasiZ(1,:) = populasiZ(IndeksIndividuTerbaik,:);
    TemPopulasiX(2,:) = populasiX(IndeksIndividuTerbaik,:);
    TemPopulasiY(2,:) = populasiY(IndeksIndividuTerbaik,:);
    TemPopulasiZ(2,:) = populasiZ(IndeksIndividuTerbaik,:);
else
    IterasiMulai = 2;

```

```

    TemPopulasiX(1,:) = populasiX(IndeksIndividuTerbaik,:);
    TemPopulasiY(1,:) = populasiY(IndeksIndividuTerbaik,:);
    TemPopulasiZ(1,:) = populasiZ(IndeksIndividuTerbaik,:);
end

%Linear Fitness Ranking
LinearFitness = LinearFitnessRangking(UkPop,Fitness,MaxF,MinF);

for jj=IterasiMulai:2:UkPop,
    IP1 = RouletteWheel(UkPop,LinearFitness);
    IP2 = RouletteWheel(UkPop,LinearFitness);
    if (rand < Psilang),
        TP = 1+fix(rand*(nFacts-1));
        AnakX = PindahSilangX(populasiX(IP1,:),populasiX(IP2,:),nFacts,TP);
        AnakY = PindahSilangY(populasiY(IP1,:),populasiY(IP2,:),nFacts,TP);
        AnakZ = PindahSilangZ(populasiZ(IP1,:),populasiZ(IP2,:),nFacts,TP);

        %Koreksi
        AnakX(1,:)=valid(AnakX(1,:),nFacts,nBus,nLine,AnakY(1,:));
        AnakX(2,:)=valid(AnakX(2,:),nFacts,nBus,nLine,AnakY(2,:));

        TemPopulasiX(jj,:) = AnakX(1,:);
        TemPopulasiX(jj+1,:) = AnakX(2,:);
        TemPopulasiY(jj,:) = AnakY(1,:);
        TemPopulasiY(jj+1,:) = AnakY(2,:);
        TemPopulasiZ(jj,:) = AnakZ(1,:);
        TemPopulasiZ(jj+1,:) = AnakZ(2,:);
    else
        TemPopulasiX(jj,:) = populasiX(IP1,:);
        TemPopulasiX(jj+1,:) = populasiX(IP2,:);
        TemPopulasiY(jj,:) = populasiY(IP1,:);
        TemPopulasiY(jj+1,:) = populasiY(IP2,:);
        TemPopulasiZ(jj,:) = populasiZ(IP1,:);
        TemPopulasiZ(jj+1,:) = populasiZ(IP2,:);
    end
end

%Mutasi
for kk=IterasiMulai:UkPop
    TemPopulasiY(kk,:)=MutasiY(TemPopulasiY(kk,:),PmutY,nFacts,Macam);

    TemPopulasiX(kk,:)=MutasiX(TemPopulasiX(kk,:),PmutX,nFacts,nBus,nLine,Te
    mPopulasiY(kk,:));
    TemPopulasiZ(kk,:)=MutasiZ(TemPopulasiZ(kk,:),PmutZ,nFacts);
end
populasiX=TemPopulasiX;

```

```

populasiY=TempopulasiY;
populasiZ=TempopulasiZ;
end

if (MaxF==1)&((PLoss<PLoss_awal)),
    ulang=ulang+1;
    fterbaik=terFit;
    terV = BestV;
    terDel = BestDel;
    terP = BestP;
    terQ = BestQ;
    terPs = BestPsend;
    terQs = BestQsend;
    terPr = BestPrec;
    terQr = BestQrec;
    terPL = BestPLoss;
    terQL = BestQLoss;
    PLoss_awal = PLoss;
    QLoss_awal = QLoss;
    terX = BestX;
    terY = BestY;
    terZ = BestZ;
end;
coba=coba+1
if (coba>2)
    break
end
if (ulang==0) & (MaxF<1)
    MaxF=1;
end
end
PLoss = PLoss_awal;
SL=((PLo-PLoss)/PLo)*100;
disp('-----');
disp('-----');
disp('          Newton Raphson Loadflow Analysis Setelah Diinject');
disp('-----');
disp('-----');
disp('| Bus | V | Angle | PQBUS | PQREC | PQSEND |
PQLOSS |');
disp('| No | pu | Degree | MW | MVar | MW | Mvar | MW |
MVar | MW | MVar |');
disp('-----');
disp('-----');
for m = 1:nBus
    fprintf('%3g', m); fprintf(' %8.4f', terV(m)); fprintf(' %8.4f', terDel(m));

```

```

fprintf(' %8.3f, terP(m)); fprintf(' %8.3f, terQ(m));
fprintf(' %8.3f, terPs(m)); fprintf(' %8.3f, terQs(m));
fprintf(' %8.3f, terPr(m)); fprintf(' %8.3f, terQr(m));
fprintf(' %8.3f, terPL(m)); fprintf(' %8.3f, terQL(m));fprintf('\n');
end
disp('-----');
fprintf(' Total          ');fprintf(' %8.3f, sum(terP)); fprintf(' %8.3f,
sum(terQ));
fprintf(' %8.3f, sum(terPs)); fprintf(' %8.3f, sum(terQs));
fprintf(' %8.3f, sum(terPr); fprintf(' %8.3f, sum(terQr));
fprintf(' %8.3f, sum(terPL)); fprintf(' %8.3f, sum(terQL));fprintf('\n');
disp('-----');
fprintf('\n');
fprintf('\n');

%Penanganan grafis 2D
grid on;
set(htext1,'String',sprintf('Fitness Terbaik : %7.4f, fterbaik(MaxGen));
set(htext21,'String',sprintf('%5g', terX));
set(htext31,'String',sprintf('%5g', terY));
set(htext41,'String',sprintf('%10.4f', terZ));
set(htext6,'String',sprintf('SL : %7.3f, SL));
set(htext71,'String',sprintf('%5g', length(find(terY~=0))));
plotvector = get(hbestplot,'YData');
for i=1:MaxGen
    plotvector(i) = fterbaik(i);
    set(hbestplot,'YData',plotvector);
    drawnow;
end
toc

```