

**ANALISIS KOMPENSASI DAYA REAKTIF DENGAN
MENGUNAKAN *FACTS DEVICES* PADA SALURAN
TRANSMISI SISTEM KELISTRIKAN SULAWESI SELATAN**

ANALYSIS OF REACTIVE POWER COMPENSATION BY USING FACTS
DEVICES AT THE TRINSMISSION LINE OF SOUTH SULAWESI
ELECTRICAL SYSTEM

MUTMAINNAH

P2700211031



PROGRAM PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2013

**ANALISIS KOMPENSASI DAYA REAKTIF DENGAN
MENGUNAKAN *FACTS DEVICE* PADA SALURAN
TRANSMISI SISTEM KELISTRIKAN SULAWESI SELATAN**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi

Teknik Elektro

MUTMAINNAH

P2700211031

kepada

PROGRAM PASCASARJANA

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2013

HALAMAN PENGESAHAN

Judul : **Analisis Kompensasi Daya Reaktif Dengan
Menggunakan *FACTS Devices* Pada Saluran
Transmisi Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan**

Nama : Mutmainnah

No. Pokok : P2700211031

Konsentrasi : Teknik Energi Listrik

Menyetujui,

Komisi Penasehat

Ketua

Sekretaris

**Prof.Dr.Ir.H.Nadjamuddin Harun, MS Prof.Dr. Ir.H. Muhammad Tola,
M.Eng**

Ketua Program Studi S2 Teknik Elektro
Pascasarjana Unhas,

Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, MT

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karunianya sehingga penyusunan tesis ini dapat diselesaikan dengan baik.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat kurikuler untuk mencapai gelar Sarjana Strata Dua pada Jurusan Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin. Penulisan tugas akhir ini dilatari pentingnya analisis besarnya daya reaktif yang diberikan pada saluran untuk menjaga kestabilan sistem kelistrikan khususnya di Sulawesi Selatan.

Selama penyusunan tesis ini, penulis banyak mendapat bimbingan dan masukan dari dosen program studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin serta bantuan dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang sebesar – besarnya kepada :

1. Orang tua penulis Drs. Rafrin Sinala dan Sumarti T yang telah merawat dan membesarkan dengan penuh kasih sayang serta telah memberikan dorongan untuk terus berjuang dan doa hingga saat ini.

2. Bapak Prof. Dr. Ir. H Nadjamuddin Harun, M.S selaku pembimbing I dan Bapak Prof. Dr. Ir. Muhammad Tola, M.Eng selaku pembimbing II yang telah memberikan banyak perhatian dan arahan hingga selesainya tesis ini.
3. Tim penguji Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, MT, Prof. Dr. Ir. Arief, Dipl. Ing., dan Dr. Eng Syafruddin, ST. M.Eng, Prof. Dr. Ir. Ansar Suyuti, MT yang telah memberikan saran dan kritik untuk perbaikan tesis ini.
4. Pihak PT.PLN Persero Wilayah Sulseltrabar dan AP2B sistem Sulsel yang telah memberikan bantuan untuk kelancaran penelitian ini.
5. Seluruh dosen pengajar program studi Teknik Elektro Program Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah memberi dan mengajarkan ilmunya yang sangat bermanfaat bagi penulis.
6. Saudara - saudariku tercinta Asmawaty, Mardhiyyah, Khairunnisa, Aida Mawadda, Muhammad Syaifullah, Khusnul Khatimah, Nurkhairah, dan Nurizzatul Mu'minah atas semua dukungan dan kebersamaan selama saya menempuh pendidikan.
7. Seluruh teman – teman kuliah k Sharma Thaha, k Dian, k Amel, k Dina, Pak Nirwan, Pak Mahyu, Pak Haris, Pak Afip, Pak Ali, Pak Yadi, Pak Nico, Pak Imran, dan para sahabat Rahma, Rukayya dkk yang senantiasa memberikan dorongan dan bantuan selama penyusunan tesis ini.

Semoga amal kebaikan bapak dan ibu serta rekan – rekan sekalian mendapat pahala dan ganjaran yang setimpal dari Allah SWT, amin.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyusunan tesis ini masih banyak kekurangan – kekurangan untuk itu penulis dengan senang hati mengharapkan kritik dan saran dari semua pihak untuk kesempurnaan tesis ini.

Akhir kata semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi kemajuan pengetahuan khususnya dibidang Teknik Elektro serta dapat diaplikasikan untuk meningkatkan kualitas hidup bersama.

Makassar, 16 Juli 2013

Penulis

ABSTRAK

MUTMAINNAH. Analisis Kompensasi Daya Reaktif Dengan Menggunakan *FACTS Devices* Pada Saluran Transmisi Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan. (dibimbing oleh **Nadjamuddin Harun** dan **Muhammad Tola**)

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui letak pemasangan *FACTS devices* jenis TCSC yang optimal, besar kompensasi daya reaktif serta mengetahui kinerja sistem kelistrikan Sulawesi Selatan.

Penelitian ini dilaksanakan di wilayah Sulawesi Selatan, khususnya di PT. PLN (Persero) Area Penyaluran dan Pengontrolan Beban (AP2B) SULSELTRABAR. Pada penelitian ini digunakan metode *newton-raphson* untuk menghitung aliran daya dan metode *fuzzy logic* untuk menentukan lokasi *FACTS devices* dimana besar tegangan dan rugi – rugi daya menjadi variabel acuan penentuan lokasi yang tepat.

Dari penelitian ini diketahui bahwa lokasi yang tepat untuk pemasangan TCSC adalah pada line 19 yaitu antara bus Makale dan bus Palopo dan line 27 yaitu antara bus Talasa dan Jeneponto. Sebelum pemasangan TCSC terdapat beberapa bus yang kritis yaitu berada diluar range yang diizinkan dan terdapat rugi – rugi saluran yang cukup tinggi. Namun setelah pemasangan TCSC semua tegangan bus pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan berada pada nilai standar operasional. Kinerja sistem pun mengalami peningkatan hingga 20%.

ABSTRACT

MUTMAINNAH. Analysis of Reactive Power Compensation by Using *FACTS devices* at Trinsmission Line of South Sulawesi Electrical System (supervised by **Nadjamuddin Harun** and **Muhammad Tola**).

This study aims to know optimal location of installing FACTS devices, kind of TCSC, reactive power compensation, and performance of the electrical system of South Sulawesi

This study was conducted in South Sulawesi, especially in PT. PLN (Persero) Area of Load Distribution and Control SULSELTRABAR. In this study, the Newton-Raphson method is used to calculate power flow and fuzzy logic method is used to determine the location of FACTS devices, where voltage and power losses are being reference variable to determaine the exact location.

From this research, we know that the exact location to install TCSC is on line 19 between Makale bus and Palopo bus and line 27 between Talasa bus and Jenepono bus. Before installing TCSC, there are some critical buses which have voltage range out of permitted range dan power losses that are high enough. But after installating TCSC, all of the bus voltages on the electrical system of South Sulawesi are on the operational standar. Then the performance of this system also increased by 20%.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR SINGKATAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	4
C. Tujuan	4
D. Manfaat Penelitian	5
E. Batasan Masalah	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
A. Study Aliran Beban.....	7
B. Prinsip Dasar Kompensasi Daya Reaktif.....	14
C. Kinerja Saluran Transmisi	20

D. <i>FACTS Devices</i>	22
1. Sejarah Perkembangan Peralatan <i>FACTS Devices</i>	24
2. <i>Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)</i>	32
E. Logika Fuzzy	34
1. Pengertian logika fuzzy	34
2. Dasar – dasar logika fuzzy.....	35
3. Fungsi keanggotaan	36
4. Cara kerja logika fuzzy.....	37
5. Metode mamdani	38
F. Kerangka Pikir	39
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	40
A. Desain Penelitian	40
B. Lokasi dan Waktu Penelitian	42
C. Sumber Data dan Jenis Penelitian	42
D. Instrumen Penelitian	43
E. Metode Analisis Penelitian	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
A. Gambaran Umum Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan.....	44
B. Hasil Penelitian	50
1. Aliran daya sebelum pemasangan TCSC	50
2. Penentuan Lokasi <i>FACTS devices</i>	59
3. Aliran Daya Setelah Pemasangan TCSC	66
C. Pembahasan	70

1. Aliran Daya Sebelum Pemasangan TCSC	70
2. Lokasi Penempatan TCSC	70
3. Aliran Daya Setelah Pemasangan TCSC	72
4. Analisis Kompensasi Daya Reaktif	73
5. Kinerja Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan	76
BAB V PENUTUP	80
A. Simpulan.....	80
B. Saran	81
DAFTAR PUSTAKA.....	82
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tipikal bus dari sistem tenaga	10
Gambar 2.2	Flowchart algoritma analisis aliran daya dengan metode Newton-Rapshon	13
Gambar 2.3	Model sistem transmisi daya	15
Gambar 2.4	Sistem transmisi dengan kompensasi shunt (a) model sederhana (b) Diagram fasa (c) kurva sudut daya.....	18
Gambar 2.5	Sistem transmisi dengan kompensasi seri. (a) model sederhana (b) Diagram fasa (c) kurva sudut daya.....	19
Gambar 2.6	Peralatan FACTS sederhana.....	23
Gambar 2.7	Saluran transmisi dengan peralatan FACTS yang sedikit lebih kompleks.....	24
Gambar 2.8	<i>Static VAR Compensator (SVC)</i>	25
Gambar 2.9	<i>NGH - SubSynchronous Resonance</i>	26
Gambar 2.10	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)</i>	27
Gambar 2.11.	<i>Static Synchronous Condenser (STATCON)</i>	28
Gambar 2.12	<i>Thyristor Controlled Phase angle Regulator (TCPR)</i>	29
Gambar 2.13	Unified Power Flow Controller	30
Gambar 2.14	Bagan Pengelompokan <i>FACTS devices</i>	32
Gambar 2.15	Rangkaian sederhana TCSC	33
Gambar 2.16	Grafik keanggotaan kurva linear	36

Gambar 2.17	Grafik keanggotaan kurva segitiga	37
Gambar 2.18	Struktur sistem inferensi fuzzy	37
Gambar 2.19	Kerangka pikir penelitian	39
Gambar 3.1	Flowchart algoritma proses penelitian	41
Gambar 4.1	Peta sistem kelistrikan Sulawesi Selatan.....	45
Gambar 4.2	<i>Main Graphical User Interface (GUI)</i> dari PSAT	51
Gambar 4.3	GUI untuk <i>static report PSAT</i>	52
Gambar 4.4	Single line diagram sistem kelistrikan Sulawesi Selatan	53
Gambar 4.5	Model simulink PSAT sistem kelistrikan Sulawesi Selatan	54
Gambar 4.6	Profil tegangan sebelum pemasangan TCSC	58
Gambar 4.7	Aplikasi pada <i>Fuzzy inference system</i> pada Fuzzy Logic Toolbox	59
Gambar 4.8	Fungsi keanggotaan ‘tegangan’	60
Gambar 4.9	Fungsi keanggotaan ‘P losses’	61
Gambar 4.10	Fungsi keanggotaan ‘Lokasi FACTS’	62
Gambar 4.11	rule viewer.	63
Gambar 4.12	Profil tegangan setelah pemasangan TCSC.....	65
Gambar 4.13	Model simulink sistem kelistrikan Sulawesi Selatan setelah pemasangan TCSC	66
Gambar 4.14	Profil tegangan sebelum dan setelah pemasangan TCSC.....	73

Gambar 4.15 Grafik rugi – rugi daya aktif sebelum dan setelah pemasangan TCSC	74
Gambar 4.16 Grafik rugi – rugi daya reaktif sebelum dan setelah pemasangan TCSC	75
Gambar 4.17 Grafik kinerja sistem kelistrikan sebelum dan setelah pemasangan TCSC	78

DAFTAR TABEL

Table 4.1	Penomoran bus dan tegangan kerja sistem Sulawesi Selatan	46
Tabel 4.2	Data resistansi, reaktansi, dan admitansi shunt saluran transmisi.....	47
Tabel 4.3	Data pembangkitan dan pembebanan sistem kelistrikan Sulawesi Selatan saat beban puncak (tanggal 15 April 2013).....	48
Tabel 4.4	Hasil perhitungan tegangan, sudut tegangan, daya aktif, dan daya reaktif pembangkitan dan beban pada tiap bus sebelum pemasangan TCSC	55
Tabel 4.5	Hasil aliran daya aktif dan daya reaktif serta rugi – rugi daya aktif dan reaktif disetiap bus.....	56
Tabel 4.6	Aturan fuzzy	63
Tabel 4.7	Hasil daripada proses defuzzyfikasi	64
Tabel 4.8	Data pembangkitan dan pembebanan sistem kelistrikan Sulawesi Selatan saat beban puncak (tanggal 15 April 2013).....	67
Tabel 4.9	Hasil aliran daya aktif dan daya reaktif serta rugi – rugi daya aktif dan reaktif disetiap bus.....	68
Tabel 4.10	Kinerja sistem sebelum pemasangan TCSC.....	76
Tabel 4.11	Kinerja sistem setelah pemasangan TCSC.....	77

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran I : Data Aliran Daya, Tegangan, Dan Rugi – Rugi Daya Setelah Pemasangan Facst Devices Jenis Tcsc Pada Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan
- Lampiran II : Data Aliran Daya, Tegangan, Dan Rugi – Rugi Daya Setelah Pemasangan Facst Devices Jenis Tcsc Pada Sistem Kelistrikan Sulawesi Selatan
- Lampiran III : Data Pembangkitan, Aliran Daya, Beban, Impedansi Penghantar, Data Impedansi Generator, Dan Tipe Konstruksi Saluran Dari Pt Pln Persero Wilayah Sulseltrabar
- Lampiran IV : Validasi Data Aliran Daya dan Tegangan

DAFTAR SINGKATAN

FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>
PSAT	<i>Power System Analysis Toolbox</i>
STTL	Saluran Transmisi Tegangan Listrik
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
NGH-SSR	<i>Narain G. HIngorani-Sub Synchronous Resonance</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
STATCON	<i>Synchronous Condenser</i>
GTO	<i>Gate Turned-Off</i>
UPFC	<i>Unified Power Flow Controller</i>
TCSR	<i>Thyristor Controlled Braking Resistor</i>
TCSC	<i>Thyristor Controlled Series Capacitor</i>
GUI	<i>Graphical User Interface</i>

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Salah satu bagian penting dalam sistem tenaga listrik adalah saluran transmisi yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari pusat pembangkit ke pusat – pusat beban. Pada umumnya pusat pembangkit berada jauh dari pusat beban sehingga membutuhkan sistem transmisi yang mampu bekerja secara optimal. Jaringan yang luas menyebabkan pengoperasian sistem tenaga listrik menjadi lebih rumit [13]. Pertumbuhan beban yang sangat pesat saat ini dan tidak mampu diimbangi dengan penambahan dan perbaikan sistem transmisi karena perhitungan ekonomis menyebabkan banyaknya masalah yang timbul dalam sistem transmisi seperti drop tegangan yang cukup tinggi, besarnya rugi – rugi transmisi dan menurunnya stabilitas dan keandalan sistem.

Sama halnya dengan kondisi sistem kelistrikan Sulawesi Selatan dimana pusat beban berada di bagian selatan yaitu kota Makassar sedangkan sebagian besar pembangkit berada di bagian utara seperti pembangkit PLTA Bakaru, PLTG/U Sengkang, PLTA Poso, dll. Hal ini menyebabkan besarnya rugi – rugi daya dan drop tegangan pada sistem. Oleh karena itu salah satu langkah penyelesaian yang umum dilakukan adalah dengan penambahan *capasitor bank* pada sistem untuk menjaga stabilitas tegangan dan mengurangi rugi – rugi daya. Selain itu dengan

adanya penambahan pembangkit baru seperti PLTA Poso dan PLTA Jenepono mengakibatkan kinerja saluran transmisi harus mendapat perhatian untuk menjaga kontinuitas penyediaan energi listrik kepada masyarakat.

Kompensator daya reaktif (reactive power compensator) berfungsi untuk mengontrol daya reaktif pada sistem transmisi daya yang bertujuan untuk meminimalkan rugi transmisi, memaksimalkan kemampuan transmisi daya, dan menjamin pasokan tegangan listrik. Menginjeksikan daya reaktif pada sistem akan menaikkan tegangan, sebaliknya menyerap daya reaktif akan menurunkan tegangan. Cara tradisional yang murah dan paling mudah untuk digunakan adalah pemasangan kapasitor shunt. Fluktuasi tegangan dapat dikontrol dengan meng-on dan off kapasitor shunt ini. Namun kontrol masa depan pada sistem kelistrikan berkembang dengan sangat cepat dimana salah satunya yang saat ini mulai secara luas digunakan adalah *FACTS Device*.

Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) merupakan salah satu dari kontroler elektronika [6] yang berfungsi membangkitkan atau menyerap daya reaktif pada sistem tenaga listrik secara fleksibel, cepat, dan efektif. [7,8,13]. 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 [13].

Sistem kelistrikan Sulawesi Selatan sendiri sampai saat ini belum menggunakan *FACTS devices*. Peralatan yang masih umum digunakan untuk membatasi drop tegangan yang terjadi pada saluran transmisi adalah dengan menggunakan kapasitor shunt dan tidak menutup kemungkinan akan tergantikan dengan *FACTS devices*. Pada penelitian ini akan dipusatkan pada penentuan lokasi penempatan *FACTS devices* dalam sistem dengan menggunakan metode *Fuzzy logic* karena lokasi *FACTS devices* ini sangat penting untuk mendapatkan hasil kompensasi yang maksimal serta mengukur tingkat efisiensi dari saluran transmisi setelah *FACTS devices*.

Peralatan *FACTS devices* yang telah banyak diaplikasikan adalah jenis TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) yang berfungsi sebagai pengendali impedansi pada jaringan transmisi. Penggunaan TCSC dapat meningkatkan kualitas aliran daya serta stabilitas saluran transmisi. Pada penelitian ini, jenis *FACTS devices* yang akan diaplikasikan pada sistem kelistrikan Sulawesi Selatan adalah jenis TCSC ini.

B. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menentukan kondisi sistem kelistrikan Sulawesi Selatan sebelum dan setelah pemasangan *FACTS devices*.
2. Bagaimana menentukan lokasi penempatan *FACTS devices* yang tepat untuk mengoptimalkan kompensasi daya reaktif pada sistem transmisi Sulawesi – Selatan.
3. Bagaimana menentukan kompensasi daya reaktif *FACTS devices* pada sistem transmisi Sulawesi – Selatan dalam pengoptimalan *readability* dan stabilitas sistem transmisi.
4. Bagaimana menentukan efisiensi saluran transmisi setelah pemasangan *FACTS devices*.

C. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut :

1. Untuk menentukan kondisi sistem kelistrikan Sulawesi Selatan sebelum dan setelah pemasangan *FACTS devices*.
2. Untuk menentukan lokasi penempatan *FACTS devices* yang tepat untuk mengoptimalkan kompensasi daya reaktif pada sistem transmisi Sulawesi – Selatan

3. Untuk menentukan kompensasi daya reaktif *FACTS devices* pada sistem transmisi Sulawesi – Selatan dalam pengoptimalan *readability* dan stabilitas sistem transmisi.
4. Untuk menentukan efisiensi saluran transmisi setelah pemasangan *FACTS devices*.

D. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Dapat menjadi salah satu alternative pemecahan masalah *loadability* dan *congestion* line transmisi pada sistem kelistrikan Sulawesi – Selatan.
2. Dapat menjadi solusi masalah ketidakstabilan dan kurangnya keandalan sistem tenaga listrik Sulawesi Selatan akibat pertumbuhan beban yang sangat cepat dimana tidak sebanding dengan penambahan dan perbaikan saluran transmisi.

E. Batasan Masalah

Adapun yang akan menjadi batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Sistem yang akan diteliti adalah sistem kelistrikan Sulawesi – Selatan, PT PLN Persero SULESELBAR.
2. Analisis aliran daya akan dilakukan dengan menggunakan PSAT (*Power System Analysis Toolbox*) berbasis MATLAB.
3. Metode penempatan *FACTS devices*, penentuan jenis dan kapasitas *FACTS devices* adalah dengan menggunakan metode logika fuzzy.
4. Program yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan menggunakan *software* MATLAB 7.0 (R2010b).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Study Aliran Beban

Sistem tenaga listrik merupakan gabungan dari beberapa generator, transformator, elemen beban pasif dan aktif, dan semua perlengkapan – perlengkapan lainnya yang diinterkoneksi satu sama lain melalui suatu jaringan transmisi antara bus – bus yang jumlahnya relatif sangat banyak [1].

Studi aliran beban bertujuan untuk mengetahui besar aliran daya baik daya aktif maupun daya reaktif serta untuk mengetahui besar tegangan sistem pada terminal atau bus tertentu dan besar frekuensi yang diijinkan pada batas – batas tertentu [9].

Secara umum tujuan daripada studi aliran beban adalah :

1. Mengetahui besar tegangan dan sudut fasa pada setiap bus.
2. Mengetahui batas kemampuan peralatan yang digunakan dalam sistem dan mengetahui keefektifan dan efisiensi pemilihan peralatan yang digunakan.
3. Mengetahui kondisi awal bagi studi – studi selanjutnya seperti studi hubung singkat, studi rugi – rugi transmisi dan studi stabilitas [8].

Didalam studi aliran daya, pada tiap – tiap bus terdapat 4 macam besaran yaitu : (1) daya real atau daya aktif P (Watt), (2) daya reaktif Q (Var), (3)

harga skalar tegangan $|V|$ (Volt), (4) sudut fasa tegangan θ dan bus – bus ini terbagi atas 3 macam yaitu :

- a. Slack bus atau swing bus merupakan bus referensi dimana harga skalar tegangan $|V|$ dan sudut fasanya θ diketahui. Bus ini berfungsi untuk mencatu rugi – rugi dan kekurangan daya aktif dan daya reaktif pada jaringan. Karena berfungsi untuk mengimbangi aliran daya maka sebaiknya bus yang dipilih untuk bus ini adalah bus yang berdaya besar.
- b. Voltage controlled bus (PV) biasa juga disebut bus generator. Pada bus ini besar daya real dan harga skalar tegangan $|V|$ diketahui.
- c. Load bus merupakan bus dimana besar daya real P dan daya reaktif Q diketahui [1,9].

Pada penelitian ini untuk menghitung aliran beban digunakan metode Newton-Raphson. Menurut (Cekmas Cekin, 2007) metode newton memiliki perhitungan lebih baik daripada metode Gauss-Seidel bila untuk sistem tenaga yang besar karena lebih efisien dan praktis.

1. Persamaan Jaringan [9]

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

n : jumlah total bus

Y_{ii} : elemen diagonal matriks admitansi

- Y_{ij} : elemen diluar diagonal matriks admitansi
- V_i : tegangan pada bus i
- I_i : arus yang mengalir kedalam jaringan pada bus i

Atau

$$I_{bus} = Y_{bus}V_{bus} \dots\dots\dots (2.2)$$

2. Persamaan Aliran Daya [1]

Aplikasi hukum kirchoff pada bus ini diberikan dalam :

$$I_i = Y_{i0}V_i + Y_{i1}(V_i - V_1) + \dots + Y_{in}(V_i - V_n) \dots\dots\dots (2.3)$$

$$I_i = (Y_{i0} + Y_{i1} + \dots + Y_{in})V_i - Y_{i1}V_1 - \dots - Y_{in}V_n \dots\dots\dots (2.4)$$

Atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.5)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \dots\dots\dots (2.6)$$

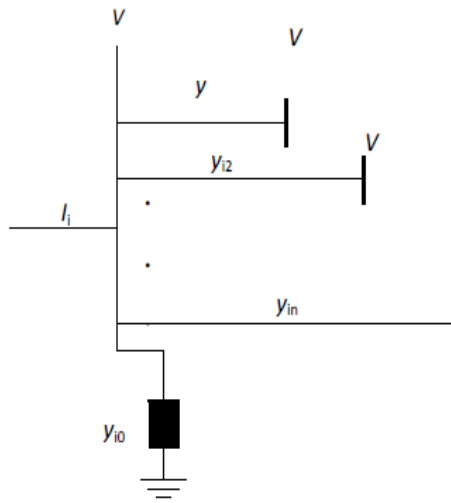
Atau

$$I_i = \frac{P_i + jQ_i}{V_i^*} \dots\dots\dots (2.7)$$

Substitusi untuk I_i pada persamaan (1-7), hasilnya :

$$\frac{P_i + jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad j \neq i \dots\dots\dots (2.8)$$

Dari persamaan diatas formulasi perhitungan dari aliran daya dalam sistem tenaga listrik harus diselesaikan dengan teknik iterasi.



Gambar 2.1 Tipikal bus dari sistem tenaga[cekmas]

3. Metode Newton-Raphson [1]

Dari gambar 1.3 arus yang memasuki bus i dapat dicari dengan persamaan (2.5) yaitu :

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \dots\dots\dots(2.9)$$

Persamaan diatas bila ditulis dalam bentuk polar adalah :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots(2.10)$$

Daya kompleks pada bus i adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \dots\dots\dots(2.11)$$

Pisahkan bagian real dan imajiner

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \dots\dots\dots(2.12)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \dots\dots\dots(2.13)$$

Persamaan 2. 12 – 2. 13 membentuk persamaan Aljabar *nonlinear* dengan variabel sendiri. Besarnya setiap variabel dinyatakan dalam

satuan perunit dan untuk sudut fasa dinyatakan dalam radian. Persamaan ini kemudian dikembangkan dari deret Taylor seperti persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \dots\dots(2.14)$$

Dalam hal ini bus 1 diumpamakan sebagai slack bus. Matriks Jacobian memberikan perbandingan linear antara perubahan pada sudut tegangan $\Delta\delta_i^{(k)}$ dan besarnya tegangan $\Delta|V_i^k|$ dengan sedikit perubahan pada daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif ($\Delta Q_i^{(k)}$). Dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.15)$$

Banyaknya elemen matriks Jacobian dari persamaan 1-34 ditentukan dengan $(2n - 2 - m) \times (2n - 2 - m)$ dimana n adalah banyaknya bus pada sistem, sedangkan m adalah banyaknya *voltage-controlled buses* pada sistem.

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_1 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = - |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \dots\dots\dots(2.17)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_2 adalah :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_j||Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + \sum_{j \neq 1} |V_j||Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots (2.18)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \dots (2.19)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_3 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq 1} |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots (2.20)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i||V_j||Y_{ij}| \cos (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \dots (2.21)$$

Elemen diagonal dan diagonal luar untuk J_4 adalah :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_j||Y_{ij}| \sin \theta_{ij} + \sum_{j \neq 1} |V_j||Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots (2.22)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i||Y_{ij}| \sin (\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad j \neq 1 \dots (2.23)$$

Harga dari $(\Delta P_i^{(k)})$ dan $(\Delta Q_i^{(k)})$ berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, dan ini disebut sisa daya (*power residuals*) yang diberikan dengan :

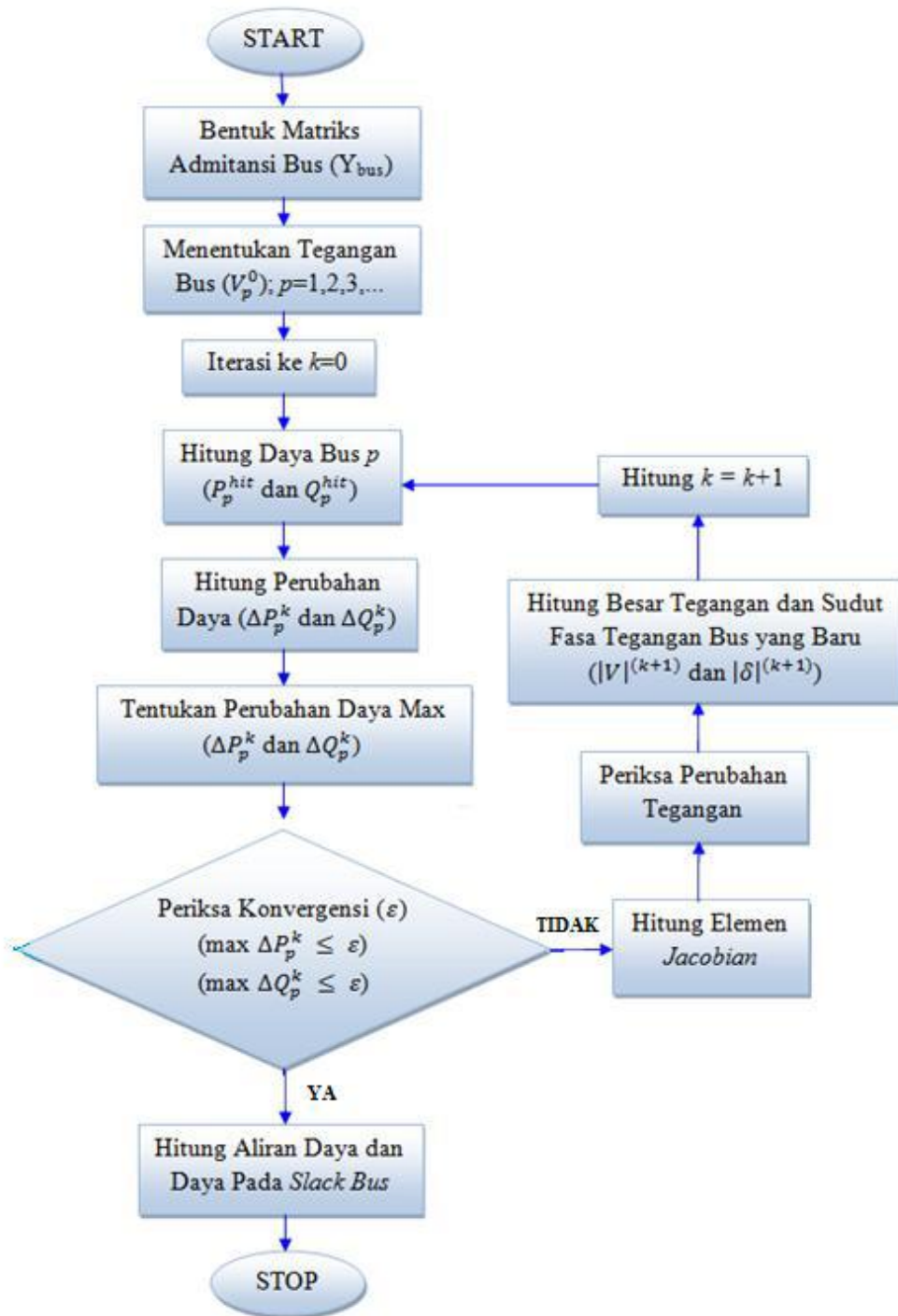
$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \dots (2.24)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \dots (2.25)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \dots (2.26)$$

$$V_i^{(k+1)} = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \dots (2.27)$$



Gambar 2.2 Flowchart algoritma analisis aliran daya dengan metode Newton-Rapshon [3]

B. Prinsip Dasar Kompensasi Daya Reaktif

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. Walaupun pengaruh kompensasi seri akan meningkatkan keduanya. 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 [2].

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

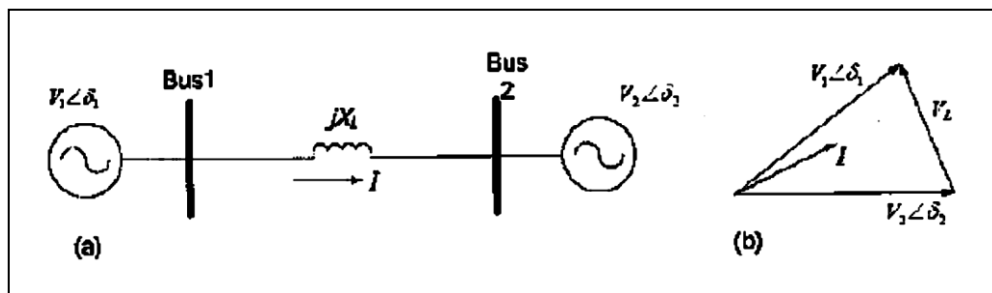
- Tegangan yang dipakai pada terminal-terminal peralatan dalam sistem tersebut harus dalam batas yang diijinkan. Jika menggunakan tegangan di luar batas kemampuan, akan mengakibatkan efek yang buruk bagi suatu peralatan.
- Meningkatkan stabilitas sistem sampai mendekati nilai maksimalnya agar dicapai suatu keadaan yang mendekati ideal.

- Mengurangi susut energi I^2X_{sa} untuk memaksimalkan penyaluran energi pada STTL.

Karena daya reaktif tidak dapat ditransmisikan dalam jarak yang jauh, maka diperlukan peralatan tambahan untuk mengatasinya. Berkaitan dengan hal tersebut, selanjutnya akan dibicarakan mengenai teori kompensasi secara singkat dibawah ini.

Kompensasi artinya proses penggantian kerugian atau cara untuk mengganti kerugian. Secara sederhana bisa juga diartikan sebagai proses pengimbangan. Kompensasi pada saluran transmisi tenaga listrik (STTL) pada dasarnya adalah memasukkan atau menyisipkan dengan sengaja peralatan penghasil/penyerap daya reaktif pada sistem tenaga listrik [2].

Gambar 2 (a) menunjukkan model sederhana dari sistem transmisi daya. Dua buah jaringan daya dihubungkan dengan sebuah saluran transmisi yang dimisalkan tidak mengandung rugi daya (*loss/less*) dan dinyatakan dengan reaktansi X_L . V_1/δ_1 dan V_2/δ_2 menyatakan phasor tegangan dari dua buah power grid bus, dengan sudut diantara keduanya $\delta = \delta_1 - \delta_2$. Diagram phasor tegangan dan arus dinyatakan pada gambar 2.3.(b)



Gambar 2.3. Model sistem transmisi daya [7]

Besaran arus pada saluran transmisi dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{|V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2|}{X_L} \dots\dots\dots (2.28)$$

Komponen aktif dan komponen reaktif dari aliran arus pada bus 1, adalah:

$$I_{d1} = \frac{V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } I_{q1} = \frac{V_1 - V_2 \cos \delta}{X_L} \dots\dots\dots (2.29)$$

Daya aktif dan reaktif pada bus 1, adalah :

$$P_1 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } Q_1 = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta)}{X_L} \dots\dots\dots (2.30)$$

Selanjutnya, hal yang sama komponen aktif dan reaktif dari arus pada bus 2 adalah :

$$I_{d2} = \frac{V_1 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } I_{q2} = \frac{V_2 - V_1 \cos \delta}{X_L} \dots\dots\dots (2.31)$$

Daya aktif dan reaktif pada bus 2, adalah :

$$P_2 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } Q_2 = \frac{V_2 (V_2 - V_1 \cos \delta)}{X_L} \dots\dots\dots (2.32)$$

Dimana :

V_L : tegangan pada line transmisi

V_1 dan V_2 : Tegangan pada bus 1 dan bus 2

δ_1 dan δ_2 : phasor tegangan bus 1 dan bus 2

δ : perbedaan phasor bus 1 dan bus 2

I : arus line transmisi

I_{d1} dan I_{d2} : Arus komponen aktif pada bus 1 dan 2

I_{q1} dan I_{q2} : Arus komponen reaktif pada bus 1 dan 2

P_1 dan P_2 : daya aktif pada bus 1 dan bus 2

Q_1 dan Q_2 : daya reaktif pada bus 1 dan bus 2

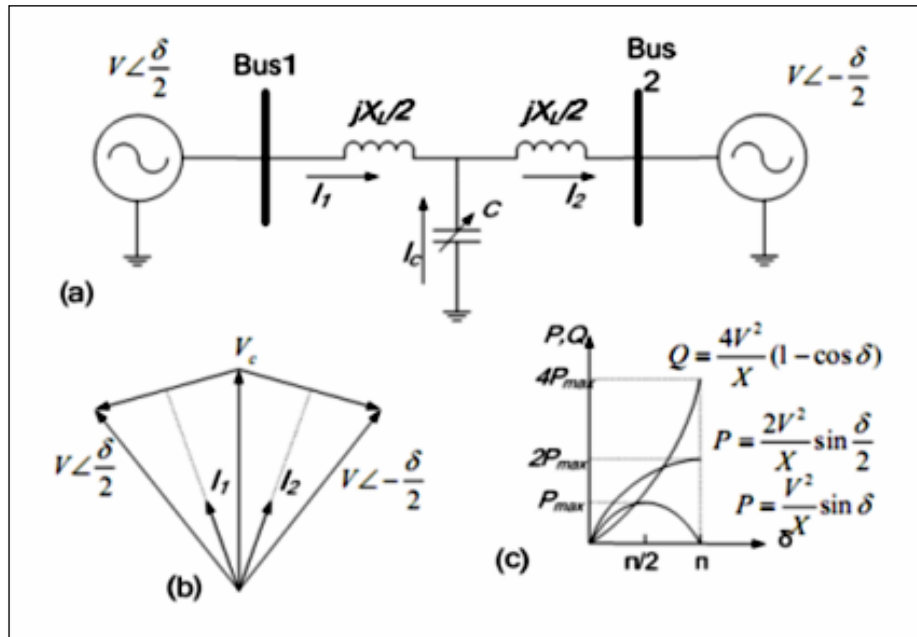
Dari persamaan (2.28) sampai dengan (2.32) terlihat bahwa untuk mengontrol daya/ arus aktif dan reaktif dapat dilakukan dengan mengatur tegangan, sudut fasa dan impedansi dari saluran transmisi.

Pada umumnya kompensasi sistem transmisi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu kompensasi shunt dan kompensasi seri.

a. Kompensasi Shunt [7]

Kompensasi reaktif shunt digunakan pada sistem transmisi untuk mengatur tegangan, memperbaiki kualitas tegangan dan mempertahankan kestabilan sistem. Selain itu reactor/inductor shunt digunakan untuk mengurangi over voltage dengan mengkonsumsi daya reaktif, sedangkan kapasitor shunt digunakan untuk menjaga level tegangan dengan mengkompensasi daya reaktif pada saluran transmisi.

Model sederhana dari sistem transmisi dengan kompensasi shunt digambarkan pada gambar 2.4a. Besaran tegangan pada kedua bus adalah V , dengan sudut fasa δ . Saluran transmisi yang dianggap *loss/less* dinyatakan dengan reaktansi X_L . Pada bagian tengah dari saluran, sebuah kapasitor terhubung secara shunt. Besaran tegangan pada titik sambungan adalah V .



Gambar 2.4. Sistem transmisi dengan kompensasi shunt (a) model sederhana (b) Diagram fasa (c) kurva sudut daya [7]

Seperti dijelaskan sebelumnya maka daya aktif pada bus 1 dan 2 adalah :

$$P_1 = 2 \frac{V^2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \dots\dots\dots (2.33)$$

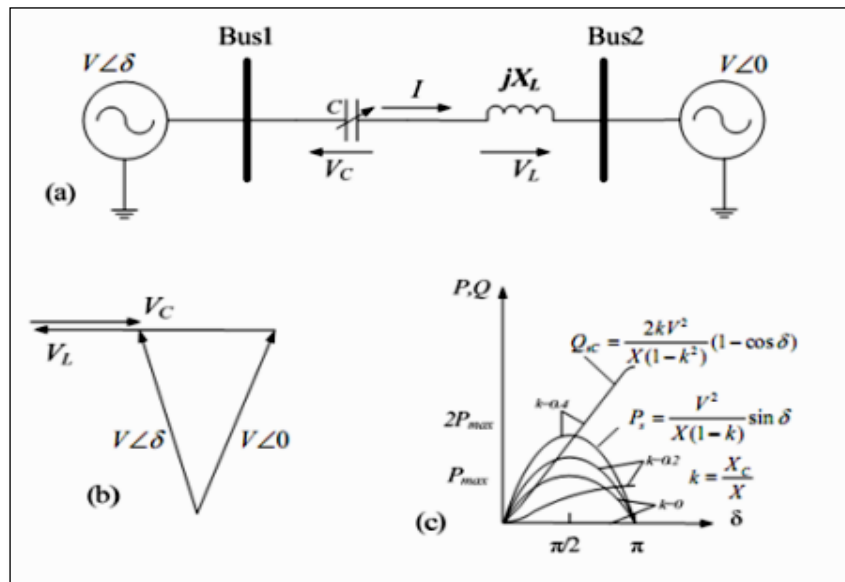
Daya reaktif yang diinjeksikan oleh kapasitor untuk mengatur tegangan pada bagian tengah saluran transmisi adalah :

$$Q_C = 4 \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \dots\dots\dots (2.34)$$

Dari kurva sudut daya pada gambar 2.4c daya yang ditransmisikan bertambah secara signifikan, dan titik puncaknya bergerak dari sudut $\delta = 90^\circ$ sampai $\delta = 180^\circ$. Margin operasi dan kestabilan sistem akan bertambah dengan adanya kompensator shunt.

b. Kompensasi Seri [7]

Kompensasi seri dimaksudkan untuk mengontrol langsung semua impedansi seri dari saluran transmisi. Berdasarkan rumus (28) sampai dengan rumus (32), transmisi daya AC ditentukan oleh impedansi reaktif seri dari saluran transmisi. Suatu sambungan impedansi seri akan menyebabkan drop tegangan yang berlawanan dengan tegangan saluran transmisi, sehingga akan mengurangi impedansi seri saluran. Model sederhana dari saluran transmisi dengan kompensasi seri digambarkan pada gambar 2.5a. Besaran tegangan dari kedua bus adalah V dan sudut fasa δ . Saluran transmisi yang dianggap lossless dinyatakan dengan reaktansi X_L . Capacitor yang terkontrol dipasang secara seri dengan saluran transmisi dengan tegangan V_C . Diagram fasa tercantum pada gambar 2.5b.



Gambar 2.5. Sistem transmisi dengan kompensasi seri. (a) model sederhana (b) Diagram fasa (c) kurva sudut daya [7]

Dengan mendefinisikan impedansi C merupakan bagian dari reaktansi saluran dengan factor kelipatan k, maka :

$$X_C = kX_L \dots\dots\dots (2.35)$$

Sehingga keseluruhan impedansi seri pada saluran adalah :

$$X = X_L - X_C = (1 - k)X_L \dots\dots\dots (2.36)$$

Daya aktif yang ditransmisikan adalah :

$$P = \frac{V^2}{(1-k)X_L} \sin \delta \dots\dots\dots (2.37)$$

Daya reaktif yang diberikan oleh kapasitor dapat dihitung sebagai berikut :

$$Q_C = 2 \frac{V^2}{X_L} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \dots\dots\dots (2.38)$$

Gambar 2.5c menunjukkan kurva sudut fasa, dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa daya aktif yang ditransmisikan akan bertambah dengan bertambahnya faktor k dimana k adalah derajat kompensasi seri.

C. Kinerja Saluran Transmisi [5]

Kinerja saluran transmisi dapat diukur menggunakan regulasi tegangan yang didefinisikan sebagai perubahan tegangan pada *receiving end*, yang dinyatakan dalam persentase (%) tegangan pada beban penuh dengan faktor daya tertentu, dimana tegangan pada *sending end* dalam keadaan konstan, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$Regulasi (\%) = \frac{|V_{R,NL}| - |V_{R,FL}|}{|V_{R,FL}|} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.39)$$

Jika persamaan 2.39 dinyatakan dalam bentuk saluran transmisi pendek, maka :

$$|V_{R,NL}| = |V_S| \text{ dan } |V_{R,FL}| = |V_R| \dots\dots\dots(2.40)$$

sehingga regulasi tegangannya menjadi :

$$\begin{aligned} \text{Regulasi (\%)} &= \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100 \% \\ &= \frac{|I| R \cos \varphi_R + |I| X \sin \varphi_R +}{|V_R|} \times 100\% \text{ (untuk lagging load)} \\ &= \frac{|I| R \cos \varphi_R - |I| X \sin \varphi_R +}{|V_R|} \times 100\% \text{ (untuk leading load) } \dots\dots(2.41) \end{aligned}$$

dimana :

$|V_{R,NL}|$ = Besar tegangan *receiving end* dalam keadaan tanpa beban

$|V_{R,FL}|$ = Besar tegangan pada *receiving end* dalam keadaan beban penuh

$|V_S|$ = besar tegangan *sending end*

$|V_R|$ = besar tegangan *receiving end*

Selain menggunakan regulasi tegangan, kinerja saluran transmisi dapat pula diukur menggunakan efisiensi saluran, yang dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi (\%)} = \frac{|P_R|}{|P_S|} \times 100 \% \dots\dots\dots(2.42)$$

dimana :

$|P_R|$ = besar daya pada *receiving* (Watt)

$|P_S|$ = besar daya pada *sending* (Watt)

D. FACTS Devices

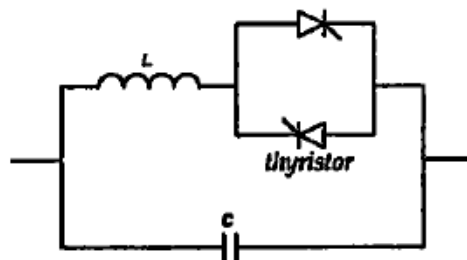
FACTS (Flexible Alternating Current Transmission systems) sudah banyak digunakan untuk menangani masalah penyaluran daya. Sebagai peralatan elektronika daya yang tersusun sendiri, peralatan FACTS sangat memungkinkan diaplikasikan pada saluran transmisi untuk meningkatkan kemampuan penyaluran daya saluran. Dengan investasi yang relatif lebih murah dan waktu pemasangan yang cepat dibandingkan dengan membangun saluran transmisi baru, aplikasi peralatan FACTS banyak menjadi pertimbangan utama oleh para perusahaan listrik. Kemampuan yang dimiliki oleh peralatan FACTS antara lain: meningkatkan kestabilan transmisi tenaga, memperbaiki nilai tegangan dan keseimbangan daya reaktif, dan memperbaiki pembagian beban pada saluran parallel [3].

Dalam pemakaiannya, peralatan FACTS mempunyai sejumlah kelebihan yaitu, dapat mengurangi resiko *subsynchronous resonance*, dan mengatur daya dinamik. Dalam interkoneksi, transfer daya yang mengalir dari satu area ke area lain dipengaruhi oleh impedansi saluran transmisi Z_L . Dengan mengikuti teori ini, peralatan FACTS mempunyai peran yang sama yang sangat berguna untuk mengoptimalkan aliran daya antar area dengan bermacam-macam beban dan konfigurasi jaringan. Sehingga dengan pemanfaatan peralatan ini sangat memungkinkan untuk melakukan pengaturan daya untuk meminimalkan rugi-rugi dan menghilangkan kelebihan beban pada saluran transmisi. Dalam suatu tenaga listrik, daya dinyatakan dengan variabel tegangan dan impedansi.

Untuk saluran transmisi, seperti ditunjukkan pada gambar 2.3 nilai resistansi dianggap sangat kecil dibandingkan dengan nilai reaktansinya X_L , sehingga daya yang disalurkan melalui saluran antara bus 1 dan bus 2 dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$P_{12} = \frac{V_1 - V_2}{X_L} \sin \delta \dots\dots\dots (2.43)$$

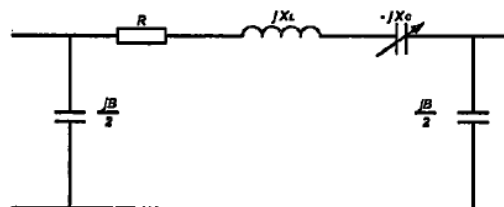
Pada Persamaan (2.43), P_{12} dapat diubah-ubah dengan cara mengontrol nilai X_L dengan sebuah kontroler. Seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.6 jenis peralatan FACTS sederhana ini dapat memiliki karakteristik induktif atau kapasitif Meskipun kombinasi dari kedua tipe dapat menguntungkan dalam tenaga, namun penalarannya harus dilakukan secara cermat. Pemodelan peralatan FACTS sederhana dapat digambarkan pada gambar 2.6 sebagai berikut.



Gambar 2.6. Peralatan FACTS sederhana [3]

Peralatan FACTS sederhana dimodelkan sebagai suatu serangkaian variabel kapasitansi ideal, tanpa rugi daya. Agar saluran transmisi tidak *overcompensate*, nilai maksimal ditetapkan pada $0.8 X_L$. Dalam proses desain, peralatan FACTS secara langsung diintegrasikan ke dalam model saluran transmisi, dan diijinkan memiliki nilai kosong.

Peralatan FACTS yang disisipkan ke dalam rangkaian dengan resistansi dan reaktansi transmisi seperti ditunjukkan dalam gambar 2.7.



Gambar 2.7. Saluran transmisi dengan peralatan FACTS yang sedikit lebih kompleks [3]

Dengan memodifikasi nilai reaktansi, maka reaktansi tersebut dapat ditulis sebagai berikut :

$$X = X_L - X_C = (1 - k)X_L \dots\dots\dots (2.42)$$

Dengan $0 \leq k \leq 0.8$ dimana X adalah reaktansi FACTS dan k adalah derajat kompensator.

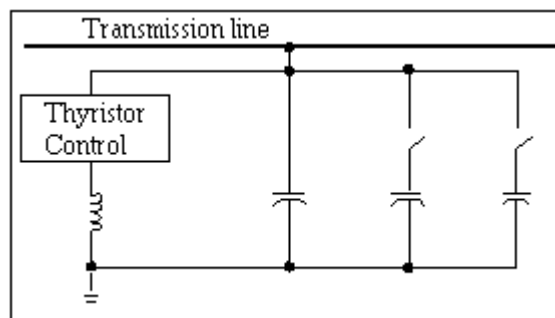
1. Sejarah Perkembangan Peralatan FACTS Devices [8]

Teknologi *Flexible AC Transmission System Controller (FACTS)* merupakan peralatan kontrol aliran daya serbaguna dan fleksibel pada jaringan transmisi, yang dalam perkembangannya 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.

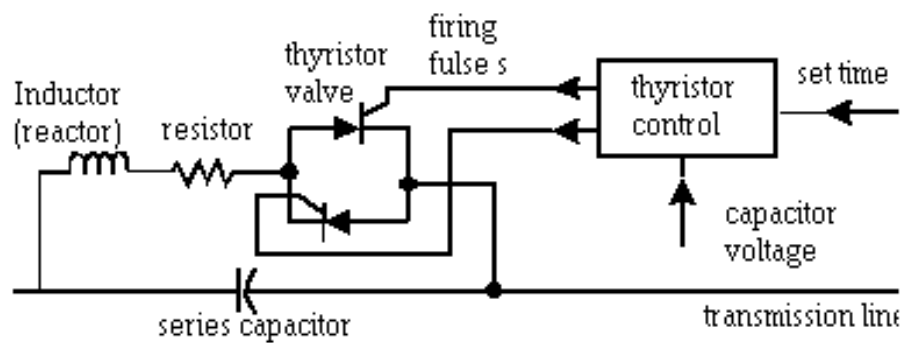
Namun kekurangannya, alat ini tidak dapat dipergunakan sebagai alat pengendali aliran daya listrik aktif (*active power*) yang sangat vital dalam sistem jaringan transmisi listrik AC. Lain dari itu, SVC juga didapati sangat rendah efisiensinya jika terjadi turunnya tegangan dari transmisi secara drastis. gambar 2.8 dibawah menunjukkan contoh dari topologi SVC.



Gambar 2.8. *Static VAR Compensator (SVC)* [8]

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 pada gambar 2.9 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).



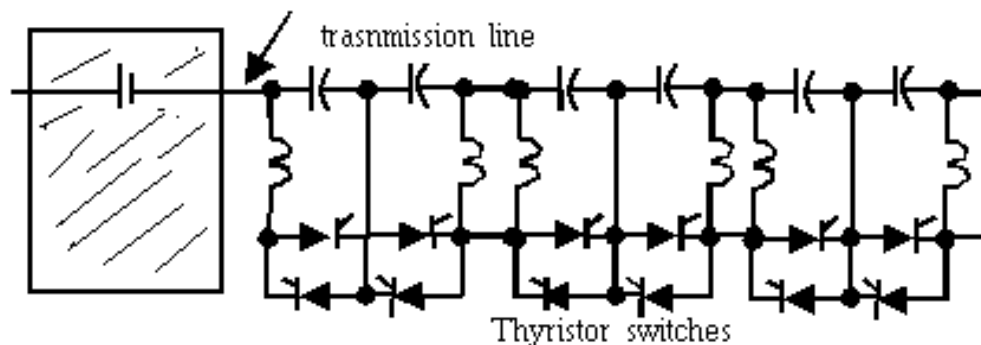
Gambar 2.9. NGH - *SubSynchronous Resonance* [8]

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 menaikkan impedansi pada transmisi yang sama.

Gambar 2.10 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.

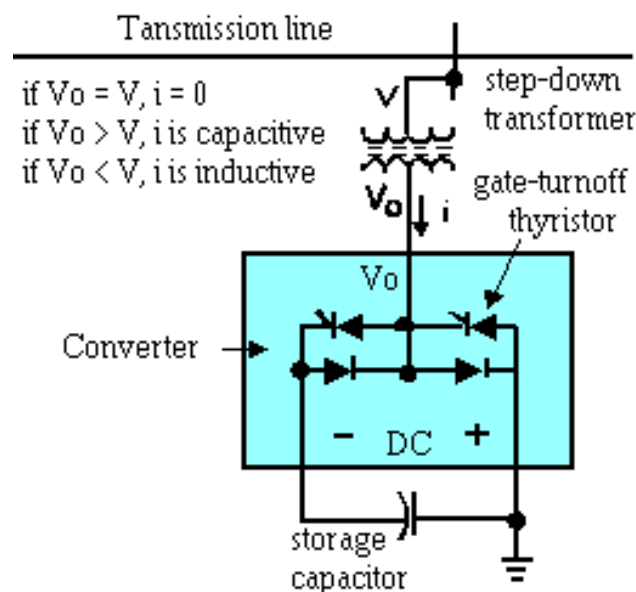


Gambar 2.10. *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*[8]

Alat yang kedua diberi nama *Static Synchronous 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*).

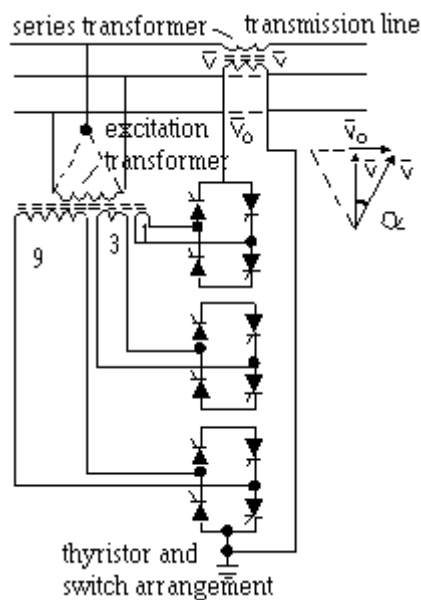
Pada dasarnya, STATCON adalah alat yang berbasis inverter tiga fasa yang dihasilkan oleh tegangan satu arah (dc) dari kapasitor seperti yang diilustrasikan oleh gambar 2.11. Pada gambar tersebut, jika tegangan V_0 lebih tinggi (atau lebih rendah) dari pada tegangan sistem transmisi V , maka selisih sudut 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*).



Gambar 2.11. *Static Synchronous Condenser* (STATCON)[8]

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 2.12 menunjukkan konsep dari TCPR ini. Penambahan sudut fasa α 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 transformator yang dihubungkan ke dua fasa dari sistem transmisi tiga fasa ini.

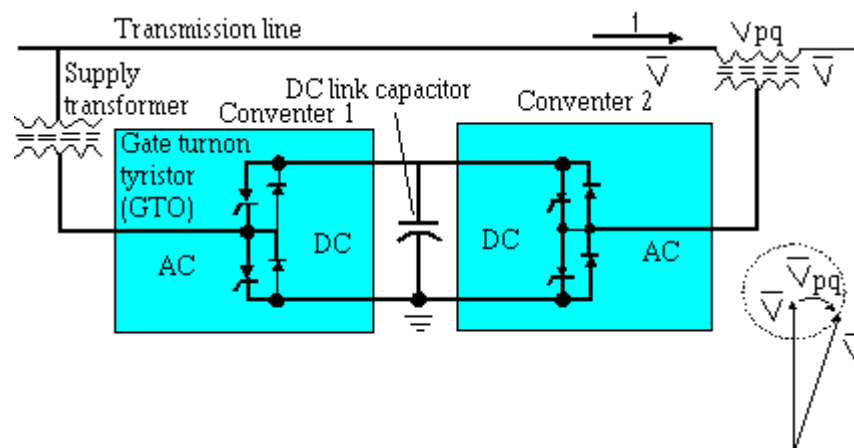


Gambar 2.12. *Thyristor Controlled Phase angle Regulator (TCPR)* [8]

Alat selanjutnya adalah konsep lain dari pengaturan selisih sudut fasa seperti pada TCPR. Alat ini diberi nama *Unified Power Flow Controller (UPFC)* yang mana perancangannya berbasis inverter dengan menggunakan *thyristor*. Sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2.13, pada UPFC, vektor tegangan V_{pq} yang dihasilkan oleh inverter disuntikkan secara seri ke jaringan transmisi. Tegangan searah (dc) yang

digunakan inverter ini didapatkan dari hasil penyearah (*rectification*) tegangan dari transmisi yang sama.

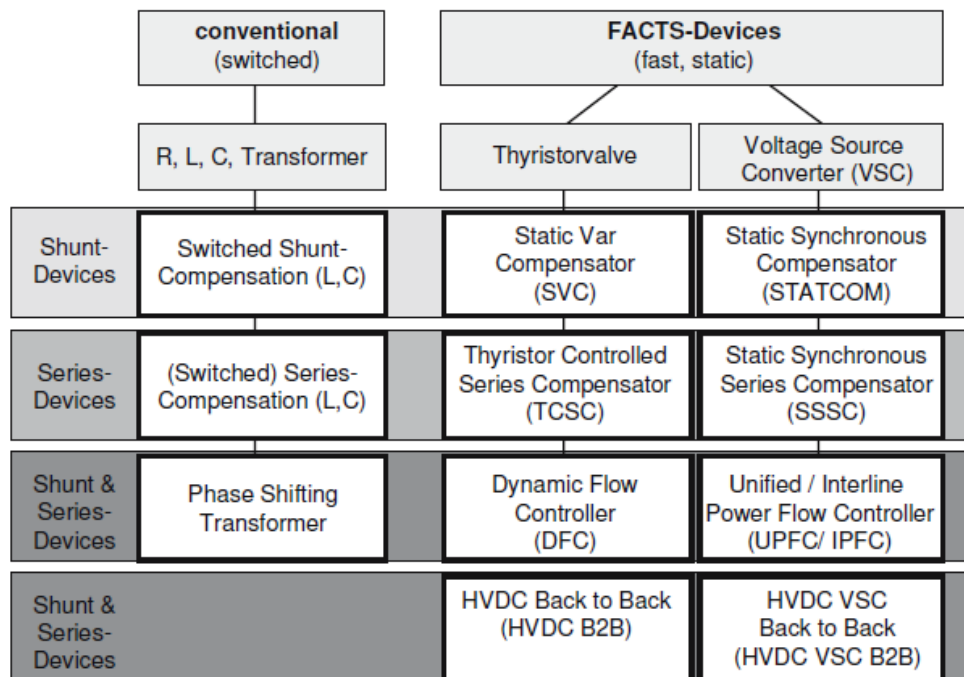
UPFC merupakan alat kendali daya aktif dan daya reaktif secara terpisah pada transmisi listrik dan dapat dipasang pada ujung pengirim maupun penerima daya. Lebih penting lagi, UPFC juga merupakan alat pengendali daya yang sangat fleksibel karena dapat menggunakan salah satu ataupun kombinasi parameter dasar dari sistem aliran daya yaitu tegangan transmisi, impedansi transmisi, dan selisih sudut fasa transmisi. Hal ini merupakan suatu keuntungan karena dengan pemasangan satu UPFC yang dapat mengendalikan ketiga parameter tersebut, maka tidak hanya sistem jaringan transmisi akan menjadi lebih baik, tetapi juga akan menjadi lebih murah dan mudah dalam pemeliharaan dan pengoperasiannya. Dengan kata lain, pemasangan satu UPFC akan sama halnya dengan pemasangan alat TCSC, STATCON dan TCPR secara bersamaan. Studi kasus terhadap UPFC, baik itu dalam skala besar maupun kecil telah berhasil dilaksanakan.



Gambar 2.13 Unified Power Flow Controller [8]

Beberapa peralatan FACTS lainnya yang juga dikembangkan adalah TCBR, TCSR, dan TCVL. TCBR adalah singkatan dari *Thyristor Controlled Braking Resistor* yang dapat menjadi alternatif yang compact dan murah dari penggunaan *Mechanically Switched Braking Resistor* yang saat ini umum digunakan. Pemasangan braking resistor dekat unit pembangkit sangat diperlukan untuk mencegah terjadinya percepatan pada generator setelah terjadinya pemutusan beban (*loss of load*) pada transmisi. Direncanakan sebelum tahun 2000 an nanti, alat TCBR ini akan mencapai tahap penyelesaian. Yang berikutnya adalah TCSR singkatan dari *Thyristor Controlled Series Reactor* yang dapat digunakan pada jaringan transmisi yang membutuhkan pengurangan beban dengan cepat dan pembatasan dari arus gangguan (*fault*). Alat ini dapat pula digunakan bersama TCSC pada jaringan transmisi yang memerlukan kompensasi induktif seri yang tinggi. Rancangan alat ini telah dilaksanakan pada pertengahan dekade 90-an. Terakhir adalah *Thyristor Controlled Voltage Limiter* berfungsi sebagai pembatas kelebihan tegangan (*overvoltage*) selama selang waktu yang relatif cukup lama yang dapat merusak peralatan pada jaringan transmisi. Sebagaimana halnya dengan TCSR, rancangan alat ini juga dimulai sekitar pertengahan dekade 90-an.

Untuk lebih jelasnya, pengelompokan *FACTS devices* dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut :

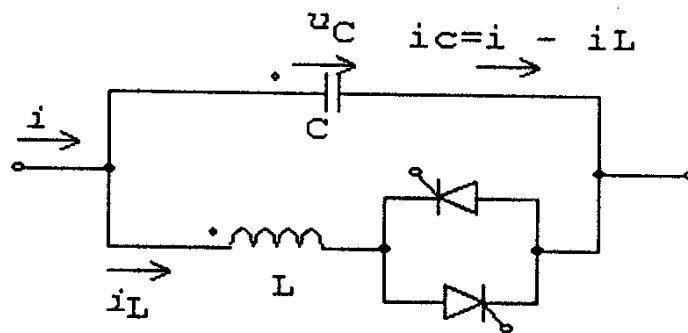


Gambar 2.14 Bagan Pengelompokan *FACTS devices* [5]

2. Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) [11]

Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) merupakan salah satu komponen *FACTS devices* yang telah banyak diaplikasikan pada sistem jaringan tenaga listrik seperti di Kayenta, Slatt, Brazil, dan China. Pemasangan TCSC menimbulkan pengaruh pada distribusi aliran daya reaktif dalam jaringan interkoneksi, sehingga TCSC dapat digunakan untuk mengendalikan stabilitas tegangan. TCSC memberikan kapasitansi variabel secara terus menerus yang dikontrol oleh sudut penyalaan TCR yang dihubungkan paralel dengan fixed capacitor. Adanya perubahan impedansi pada jaringan memberikan efek peningkatan transfer daya [11]

Komponen utama TCSC adalah TCR yang tersusun dari sebuah inductor yang seri dengan thyristor dan paralel dengan kapasitor. TCSC mampu mengatur reaktansi saluran transmisi dengan melakukan pengaturan sudut penyalan thyristor. Bentuk TCSC ditunjukkan pada gambar 2.15 berikut :



Gambar 2.15 Rangkaian sederhana TCSC [11]

Untuk optimalisasi TCSC secara matematis didefinisikan oleh hubungan antara sudut tunda penyalan dan reaktansi seri X_{min}^{TCSC} yang dihasilkan.

Suseptansi $B_{TCSC} = (X_{min}^{TCSC})^{-1}$ dihitung dengan persamaan berikut :

$$B^{TCSC}(\alpha) = B_L \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \dots\dots\dots(2.43)$$

$$B_L = \frac{1}{\omega L}, B_C = -\omega C \dots\dots\dots(2.44)$$

Untuk nilai $X_{min}^{TCSC} > 0$, maka TCSC bersifat induktif, sebaliknya $X_{min}^{TCSC} < 0$ TCSC bersifat kapasitif. Sudut penyalan α dapat diatur antara 0° hingga 90° sehingga menghasilkan reaktansi minimum dalam region induktif X_{Lmin} dan reaktansi maksimum berada dalam daerah kapasitif X_{Cmax} didefinisikan sebagai :

$$X_{Lmin} = \frac{1}{1/X_L + 1/X_C} = \frac{1}{B_L + B_C} \dots\dots\dots(2.45)$$

$$X_{Cmax} = X_C = 1/B_C \dots\dots\dots(2.46)$$

Nilai – nilai ini dapat dicapai dengan mengatur nilai α pada persamaan 2.43. TCSC memiliki daerah resonansi pada α_{res} sehingga sudut penyalaan ini reaktansi induktif dan kapasitif beresonansi. Sudut *security* margin δ harus dijaha disekitar sudut α_{res} :

$$\alpha < \alpha_{res} - \delta \text{ dan } \alpha < \alpha_{res} + \delta \dots\dots\dots(2.47)$$

Sehingga limit X_{min} dan X_{max} dapat dihitung dengan menggunakan sudut penyalaan resonansi dan sudut *security* margin δ .

$$X_{min} \leq X_{TCSC} \leq X_{max} \dots\dots\dots(2.48)$$

$$X_{min} = X_{TCSC} (\alpha_{res} + \delta) \dots\dots\dots(2.49)$$

$$X_{max} = X_{TCSC} (\alpha_{res} - \delta) \dots\dots\dots(2.50)$$

E. Logika Fuzzy

1. Pengertian logika fuzzy [12]

Konsep tentang logika fuzzy diperkenalkan oleh Prof. Lotfi Astor Zadeh pada 1962. Menurut T. Sutojo, logika fuzzy adalah metodologi sistem kontrol pemecahan masalah, yang cocok untuk diimplementasikan ada sistem, mulai dari sistem yang sederhana, sistem kecil, *embedded system*, jaringan PC, multi-channel atau workstation berbasis akuisisi data, dan sistem kontrol. Metodologi ini dapat diterapkan pada perangkat keras, perangkat lunak, atau kombinasi keduanya. Dalam logika klasik dinyatakan bahwa segala sesuatu bersifat biner, yang artinya adalah hanya mempunyai dua kemungkinan “YA atau TIDAK”, “BENAR atau

SALAH”, “BAIK atau BURUK”, dan lain – lain. Oleh karena itu, semua ini dapat mempunyai nilai keanggotaan 0 atau 1. Akan tetapi, dalam logika fuzzy memungkinkan nilai keanggotaan berada diantara 0 dan 1. Artinya, bisa saja suatu keadaan mempunyai dua nilai “YA dan TIDAK”, “BENAR dan SALAH”, “BAIK dan BURUK” secara bersamaan, namun besar nilainya tergantung pada bobot keanggotaan yang dimilikinya. Logika fuzzy dapat digunakan di berbagai bidang, seperti pada sistem diagnosis penyakit (dalam bidang kedokteran); pemodelan sistem pemasaran, riset operasi (bidang ekonomi); kendali kualitas air, prediksi adanya gempa bumi, klasifikasi dan pencocokan pola (dalam bidang teknik).

2. Dasar – dasar logika fuzzy [12]

Dalam logika fuzzy terdapat konsep himpunan fuzzy. Himpunan fuzzy memiliki 2 atribut, yaitu:

- 1) Linguistik, yaitu nama suatu kelompok yang mewakili suatu keadaan tertentu dengan menggunakan bahasa alami, misalnya drop tegangan dapat dinyatakan dalam rendah, sedang, dan tinggi.
- 2) Numeris, yaitu suatu nilai yang menunjukkan ukuran dari suatu variable, misalnya 10, 20, 35, dsb.

Selain itu terdapat beberapa parameter yaitu :

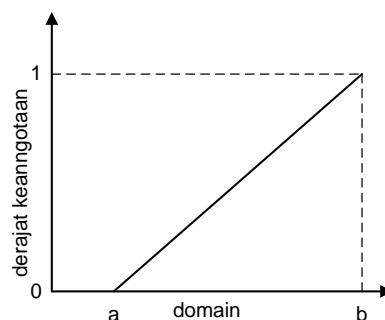
- 1) Variable fuzzy, yaitu variabel yang akan dibahas dalam suatu sistem fuzzy, contoh: besar drop tegangan, daya reaktif, rugi – rugi daya.

- 2) Himpunan fuzzy, yaitu suatu kelompok yang mewakili suatu keadaan tertentu dalam suatu variabel fuzzy.
- 3) Semesta pembicaraan, yaitu seluruh nilai yang diizinkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel fuzzy
- 4) Domain himpunan fuzzy, yaitu seluruh nilai yang diizinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan fuzzy.

3. Fungsi keanggotaan [6]

Fungsi keanggotaan adalah grafik yang mewakili besar dari derajat keanggotaan masing – masing variabel input yang berada dalam interval antara 0 dan 1. Derajat keanggotaan sebuah variabel x dilambangkan dengan $\mu(x)$. Aturan – aturan menggunakan keanggotaan sebagai faktor bobot untuk menentukan pengaruhnya pada saat melakukan inferensi untuk menarik kesimpulan. Ada beberapa fungsi keanggotaan yang sering digunakan, diantaranya :

- 1) Grafik keanggotaan kurva linear

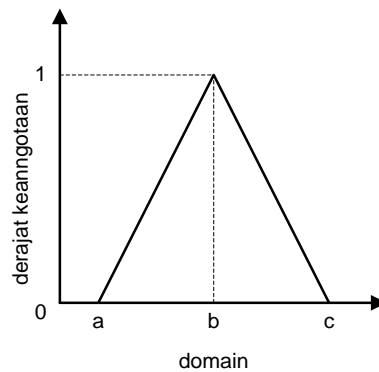


Gambar 2.16. Grafik keanggotaan kurva linear [6]

Keanggotaan :

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ 1; & x = b \end{cases} \dots\dots\dots(2.51)$$

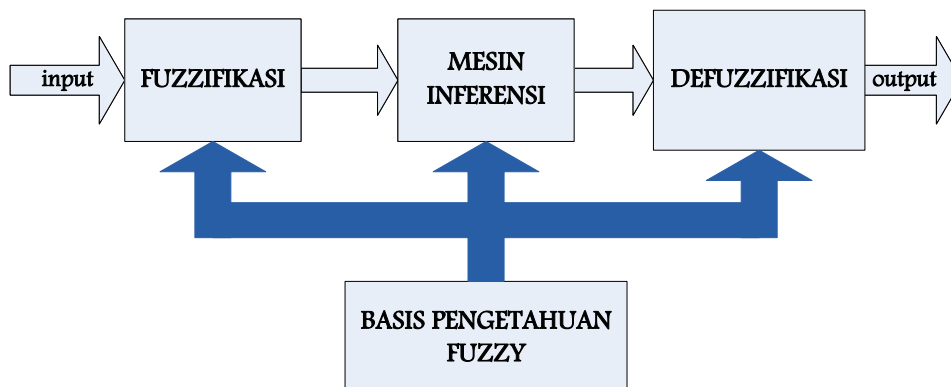
2) Grafik Keanggotaan kurva segitiga



Gambar 2.17. Grafik keanggotaan kurva segitiga [6]

$$\mu[x] = \begin{cases} 0; & x \leq a \text{ atau } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x \leq b \\ \frac{b-x}{c-b}; & x = b \end{cases} \dots\dots\dots(2.52)$$

4. Cara kerja logika fuzzy



Gambar 2.18. Struktur sistem inferensi fuzzy [12]

Keterangan :

Fuzzifikasi : proses untuk mengubah input sistem yang mempunyai nilai tegas menjadi variabel linguistik menggunakan fungsi keanggotaan yang disimpan dalam basis pengetahuan fuzzy.

Mesin inferensi : proses untuk mengubah input fuzzy menjadi output fuzzy dengan cara mengikuti aturan – aturan (*IF – THEN rules*) yang telah ditetapkan pada basis pengetahuan fuzzy.

Defuzzifikasi : mengubah output fuzzy yang diperoleh dari mesin inferensi menjadi nilai tegas menggunakan fungsi keanggotaan yang sesuai dengan saat dilakukan fuzzifikasi.

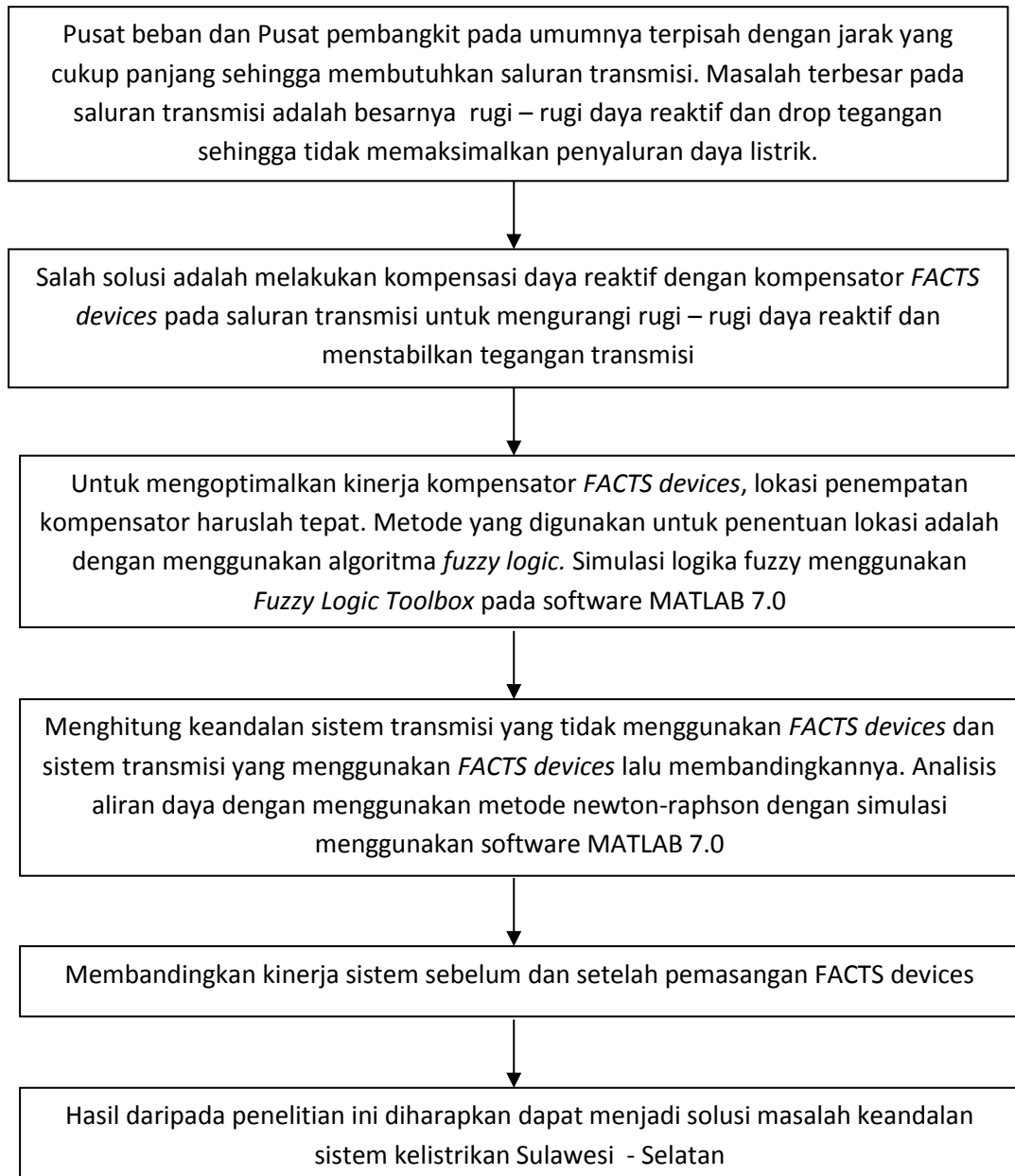
5. Metode mamdani [12]

Metode mamdani paling sering digunakan dalam aplikasi – aplikasi karena strukturnya yang sederhana, yaitu menggunakan operasi MIN-MAX atau MAX-PRODUCT. Untuk mendapatkan output, diperlukan 4 tahapan berikut :

- 1) Fuzzifikasi
- 2) Pembentukan basis pengetahuan fuzzy (rule dalam bentuk IF THEN)
- 3) Aplikasi fungsi implikasi menggunakan fungsi MIN dan komposisi antar-rule menggunakan fungsi MAX (menghasilkan himpunan fuzzy baru)
- 4) Defuzzifikasi menggunakan metode *Centroid*

F. Kerangka Pikir

Adapun kerangka pikir penelitian ini adalah ditunjukkan pada gambar 2.19 berikut :



Gambar 2.19. Kerangka pikir penelitian