

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



**SIMULASI KONTROL PI DAN PENGATUR IMPEDANSI
PADA TCSC DENGAN MENGGUNAKAN PERANGKAT
LUNAK MATLAB**

SKRIPSI

**Disusun Oleh :
Widy Mujiyanto
97.12.037**

September, 2006

LEMBAR PERSETUJUAN

SIMULASI KONTROL PI DAN PENGATUR IMPEDANSI PADA TCSC DENGAN MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK MATLAB

*Disusun dan Diajukan untuk Melengkapi dan Memenuhi Syarat
Guna Mencapai Gelar Sarjana Teknik*

Disusun Oleh :

Widy Mujiyanto

97.12.037


Mengetahui
Jurusan Teknik Elektro

(Ir. E. Yadi Limpraptono, MT)
NIP.Y. 103 950 0274

Diperiksa dan Disetujui
Dosen Pembimbing

(Ir. Widodo Pudji, M, MT)
NIP.Y. 102 870 0171

KONSENTRASI TEKNIK ENRGI LISTRIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

ABSTRAKSI

Pada umumnya pengontrolan TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) menggunakan feedback untuk mengontrol impedansi atau arus pada TCSC. Dengan pengontrolan semacam ini di peroleh hasil yang akurat, lebih stabil dan sederhana. Tetapi respon TCSC dengan model pengontrolan yang menggunakan feedback dinilai masih lambat apabila terjadi perubahan sudut penyalan (α). Hal ini disebabkan karena kontrol PI tidak dapat mendeteksi perubahan tegangan dengan cepat ketika terjadi perubahan sudut penyalan (α) pada thyristor.

Dengan teknik kontrol impedansi yang menggunakan perhitungan impedansi memungkinkan TCSC memiliki respon yang lebih cepat daripada controller yang menggunakan feedback.

Skripsi ini menyajikan simulasi pengatur impedansi dan teknik kontrol Proportional Integral (PI) pada TCSC. Sehingga didapatkan perbedaan respon kecepatan antara dua controller tersebut pada saat terjadi perubahan sudut penyalan (α) pada TCSC. Dari simulasi didapatkan untuk setting $pf = 0.92$ (rangkaiian satu sumber) kontrol impedansi lebih cepat 0.05 detik dibanding dengan teknik kontrol PI. Dengan rangkaian dua sumber untuk setting $pf = 0.9$, kontrol impedansi lebih cepat 0.125 detik dibanding dengan teknik kontrol PI. Dan untuk setting $pf = 0.95$, kontrol impedansi lebih cepat 0.225 detik dibanding dengan teknik kontrol PI.

KATA PENGANTAR

Tiada kata yang patut untuk diucapkan selain Puji syukur alhamdulillah kehadiran Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, serta lindungan-Nya yang telah dilimpahkan kepada kami sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ **SIMULASI KONTROL PI DAN PENGATUR IMPEDANSI PADA TCSC DENGAN MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK MATLAB** ” ini dengan baik dan tepat waktu.

Laporan Akhir ini digunakan untuk memenuhi salah satu syarat mengikuti ujian akhir Strata I Program Studi Teknik Elektro Energi Listrik Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Malang.

Dengan terselesainya Laporan Akhir ini, tidak lupa penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Abraham Lomi, MSEE selaku dekan Fakultas Teknologi Industri di Institut Teknologi Nasional Malang.
2. Bapak Ir. Mochtar Asroni, MSEE selaku dekan Fakultas Teknik Industri di Institut Teknologi Nasional Malang.
3. Bapak Ir. F. Yudi Limpraptono, MT selaku kajar Teknik Elektro (S-1) di Institut Teknologi Nasional Malang.
4. Bapak Ir. Widodo Pudji..M ,MT, selaku dosen pembimbing utama terima kasih atas waktu, dan bimbingannya selama penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Ir. Made Wartana, MT selaku dosen penguji I pada ujian skripsi.
6. Bapak Ir. Abdul Hamid, MT selaku dosen penguji II pada ujian skripsi.

7. Bapak, Ibu, kakakku dan Adikku serta segenap keluarga lainnya yang telah memberikan dukungan, baik moril maupun materiil.
8. Seluruh dosen elektronika dan elektro, terima kasih atas ilmu yang diberikan selama ini.
9. Semua teman-teman elektro 1997 yang telah banyak memberikan dukungan moril dan membantu mencari solusi dari permasalahan yang sering terjadi.
10. The big family of SS 2 no. 86 yang selalu suport kepadaku.

Akhirnya penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Skripsi ini masih banyak kelemahan dan kekurangannya. Namun kami berharap semoga Skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak. Saran dan kritik penulis nantikan guna perbaikan di masa yang akan datang. Mohon maaf apabila ada kesalahan dan kekurangan dalam penyusunan Skripsi ini.

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL	i
LEMBAR PERSETUJUAN	ii
ABSTRAKSI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Perumusan masalah	3
1.4. Pembatasan Masalah	3
1.5. Metodologi Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB II KOMPENSASI SERI PADA TRANSMISI	5
2.1. Kompensator Seri	5
2.2. Thyristor Controlled Reactor (TCR)	7
2.3. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)	9
2.3.1. Keuntungan – keuntungan TCSC	10
2.3.2. Rangkaian Dasar TCSC	11

2.4. Cara Kerja TCSC	14
2.4.1. Prinsip Dasar TCSC	14
2.4.2. Mode Operasi TCSC	16
BAB III THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPASITOR	21
3.1. Analisa TCSC	21
3.2. Prinsip Kerja Kontroller	30
3.2.1. PI Kontroller	32
3.2.2. Pengatur Impedansi	33
3.4. Faktor Daya	34
3.5. Diagram Fasor dan Persamaan Daya Transmisi	38
BAB IV. ANALISA DAN SIMULASI.....	41
4.1. Penentuan Parameter TCSC	42
4.2. Pemodelan TCSC Menggunakan Matlab	46
4.3. Hasil Simulasi.....	47
4.3.1. Model Jaringan Satu Sumber	48
4.3.2. Model Jaringan Dua Sumber.....	54
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	63
5.1. Kesimpulan	63
5.2. Saran	64
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Penggunaan kapasitor seri pada saluran	5
Gambar 2.2.	Pengaruh kompensasi seri	6
Gambar 2.3.	Rangkaian TCR	8
Gambar 2.4.	Arus dan tegangan pada TCR.....	9
Gambar 2.5.	Rangkaian dasar TCSC	11
Gambar 2.6.	Modul praktis TCSC	12
Gambar 2.7.	Model sistem TCSC terhubung secara cascade.....	13
Gambar 2.8.	Variabel induktor terhubung paralel dengan kapasitor	14
Gambar 2.9.	Mode Operasi TCSC	16
Gambar 2.10.	Bentuk gelombang untuk analisis capacitive vernier mode	18
Gambar 3.1.	Rangkaian sederhana TCSC.....	22
Gambar 3.2.	Variasi Reaktansi TCSC berdasarkan sudut penyalaan (α)	26
Gambar 3.3.	Variasi tegangan, arus dan reaktansi TCSC dengan per-unit TCR konduksi : (a) Arus kapasitif (pu), tegangan TCSC (pu) ; (b) X_{TCSC} (pu)	27
Gambar 3.4.	Bentuk gelombang pada capacitive vernier mode ($\alpha=150^\circ$) ..	28
Gambar 3.5.	Bentuk gelombang pada capacitive vernier mode ($\alpha=130^\circ$) ...	29
Gambar 3.6.	Variasi dari tegangan TCSC dan arus induktor pada mode operasi : (a) kapasitif, (b) induktif.....	30
Gambar 3.7.	Diagram blok controller	32

Gambar 3.8.	Blok diagram PI kontrol	33
Gambar 3.9.	Pengatur impedansi TCSC	34
Gambra 3.10.	Fasor rangkaian arus bolak-balik: (a) arus, (b) daya	35
Gambar 3.11.	Rangkaian Pengganti saluran transmisi.....	38
Gambar 3.12.	Diagram fasor saluran transmisi.....	38
Gambar 4.1.	Jaringan transmisi dengan satu sumber	41
Gambar 4.2.	Jaringan transmisi dengan dua sumber	41
Gambar 4.3.	Rangkaian TCSC.....	42
Gambar 4.4.	Plot reaktansi ekuivalen TCSC sebagai fungsi sudut konduksi β	43
Gambar 4.5.	Sistem rangkaian pengatur impedansi	46
Gambar 4.6.	Sistem rangkaian kontrol PI	47
Gambar 4.7.	Rangkaian sistem satu sumber dengan pengatur impedansi	48
Gambar 4.8.	Rangkaian sistem satu sumber dengan PIkontrol.....	49
Gambar 4.9.	Output simulasi daya (P,Q) dan power faktor tanpa TCSC	50
Gambar 4.10.	Output simulasi dengan $X_{eq} = 15\Omega$	51
Gambar 4.11.	Output simulasi pengatur impedansi dengan $X_{eq}=25\Omega$	52
Gambar 4.12.	Output simulasi kontrol PI dengan $X_{eq}=25\Omega$	53
Gambar 4.13.	Rangkaian sistem dua sumber dengan pengatur impedansi	55

Gambar 4.14. Rangkaian sistem dua sumber dengan PI kontrol	55
Gambar 4.15. Output simulasi daya (P,Q) dan power faktor tanpa TCSC	56
Gambar 4.16. Output simulasi pengatur impedansi dengan $X_{eq}=30\Omega$	56
Gambar 4.17. Output simulasi kontrol PI dengan $X_{eq}=30\Omega$	57
Gambar 4.18. Output simulasi pengatur impedansi dengan $X_{eq}=35\Omega$	58
Gambar 4.19. Output simulasi kontrol PI dengan $X_{eq}=35\Omega$	59

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Hubungan reaktansi ekuivalen dengan sudut konduksi β dan sudut penyalaan α	45
Tabel 4.2. Hasil simulasi rangkaian sistem 1 sumber	53
Tabel 4.3. Pebandingan output PI Kontroller dengan mpedansi kontroller rangkaian 1 sumber ($Pf_{ref}=0.92$)	53
Tabel 4.4. Hasil simulasi rangkaian sistem 2 sumber	59
Tabel 4.5. Pebandingan output PI Kontroller dengan impedansi kontroller rangkaian 2 sumber ($Pf_{ref}=0.9$)	60
Tabel 4.6. Pebandingan output PI Kontroller dengan impedansi kontroller rangkaian 2 sumber ($Pf_{ref}=0.95$)	60

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Penggunaan kapasitor seri pada saluran	5
Gambar 2.2.	Pengaruh kompensasi seri	6
Gambar 2.3.	Rangkaian TCR	8
Gambar 2.4.	Arus dan tegangan pada TCR	9
Gambar 2.5.	Rangkaian dasar TCSC	11
Gambar 2.6.	Modul praktis TCSC	12
Gambar 2.7.	Model sistem TCSC terhubung secara cascade	13
Gambar 2.8.	Variabel induktor terhubung paralel dengan kapasitor	14
Gambar 2.9.	Mode Operasi TCSC	16
Gambar 2.10.	Bentuk gelombang untuk analisis capacitive vernier mode	18
Gambar 3.1.	Rangkaian sederhana TCSC	22
Gambar 3.2.	Variasi Reaktansi TCSC berdasarkan sudut penyalan (α)	26
Gambar 3.3.	Variasi tegangan, arus dan reaktansi TCSC dengan per-unit TCR konduksi : (a) Arus kapasitif (pu), tegangan TCSC (pu) ; (b) X_{TCSC} (pu)	27
Gambar 3.4.	Bentuk gelombang pada capacitive vernier mode ($\alpha=150^\circ$) ..	28
Gambar 3.5.	Bentuk gelombang pada capacitive vernier mode ($\alpha=130^\circ$) ...	29
Gambar 3.6.	Variasi dari tegangan TCSC dan arus induktor pada mode operasi : (a) kapasitif, (b) induktif	30

Gambar 3.7.	Diagram blok kontroller	32
Gambar 3.8.	Blok diagram PI kontrol	33
Gambar 3.9.	Pengatur impedansi TCSC.....	34
Gambra 3.10.	Fasor rangkaian arus bolak-balik: (a) arus, (b) daya	35
Gambar 3.11.	Rangkaian Pengganti saluran transmisi	38
Gambar 3.12.	Diagram fasor saluran transmisi.....	38
Gambar 4.1.	Jaringan transmisi dengan satu sumber	41
Gambar 4.2.	Jaringan transmisi dengan dua sumber	41
Gambar 4.3.	Rangkaian TCSC.....	43
Gambar 4.4.	Plot reaktansi ekivalen TCSC sebagai fungsi sudut konduksi β	44
Gambar 4.5.	Sistem rangkaian pengatur impedansi	47
Gambar 4.6.	Sistem rangkaian kontrol PI.....	48
Gambar 4.7.	Rangkaian sistem satu sumber dengan pengatur impedansi	49
Gambar 4.8.	Rangkaian sistem satu sumber dengan PIkontrol	50
Gambar 4.9.	Output simulasi daya (P,Q) dan power faktor tanpa TCSC	51
Gambar 4.10.	Output simulasi dengan $X_{eq} = 15\Omega$	52
Gambar 4.11.	Output simulasi pengatur impedansi dengan $X_{eq}=25\Omega$	53
Gambar 4.12.	Output simulasi kontrol PI dengan $X_{eq}=25\Omega$	54
Gambar 4.13.	Rangkaian sistem dua sumber dengan	

	pengatur impedansi	56
Gambar 4.14.	Rangkaian sistem dua sumber dengan PI kontrol	56
Gambar 4.15.	Output simulasi daya (P,Q) dan power faktor tanpa TCSC	57
Gambar 4.16.	Output simulasi pengatur impedansi dengan $X_{eq}=30\Omega$	57
Gambar 4.17.	Output simulasi kontrol PI dengan $X_{eq}=30\Omega$	58
Gambar 4.18.	Output simulasi pengatur impedansi dengan $X_{eq}=35\Omega$	59
Gambar 4.19.	Output simulasi kontrol PI dengan $X_{eq}=35\Omega$	60

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Hubungan reaktansi ekivalen dengan sudut konduksi β dan sudut penyalaan α	46
Tabel 4.2. Hasil simulasi rangkaian sistem 1 sumber	54
Tabel 4.3. Pebandingan output PI Kontroller dengan impedansi kontroller rangkaian 1 sumber ($Pf_{ref}=0.92$).....	54
Tabel 4.4. Hasil simulasi rangkaian sistem 2 sumber	60
Tabel 4.5. Pebandingan output PI Kontroller dengan impedansi kontroller rangkaian 2 sumber ($Pf_{ref}=0.9$).....	61
Tabel 4.6. Pebandingan output PI Kontroller dengan impedansi kontroller rangkaian 2 sumber ($Pf_{ref}=0.95$).....	61

impedansi dari TCSC, dimana kecepatan perubahan impedansi adalah hal yang sangat penting terutama dalam hal kestabilan sistem tenaga. Untuk pengontrolan ini biasanya dipakai PI atau PID kontroler yang menggunakan feed back, dimana dengan kontrol ini mengakibatkan respon TCSC lebih lambat pada saat terjadi perubahan pada sudut penyalan (firing angle) thyristor. Hal ini disebabkan karena PI atau PID kontroler tidak dapat mendeteksi perubahan tegangan secara cepat setelah terjadi perubahan sudut penyalan thyristor. Dengan menggunakan teknik pengatur impedansi dapat dijadikan sebagai solusi yang memungkinkan TCSC memiliki respon yang lebih cepat pada saat terjadi perubahan sudut penyalan thyristor.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan yang hendak dicapai adalah menganalisa dan mensimulasikan pengaturan TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) pada suatu sistem transmisi dengan teknik pengatur impedansi dan kontrol PI. Sehingga didapatkan perbandingan antara teknik pengatur impedansi dengan kontrol PI yang menggunakan feed back pada TCSC. Dari hasil yang diperoleh maka dapat dijadikan suatu acuan atau solusi dalam hal pengaturan TCSC untuk mengoptimalkan kualitas sistem tenaga listrik.

1.3. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dibatasi pada kapasitas daya yang disalurkan dengan adanya TCSC serta respon TCSC pada saat terjadi perubahan sudut penyalaan (firing angle) dengan teknik pengatur impedansi dan kontrol PI.

1.4. Pembatasan Masalah

Pemodelan thyristor controlled series capacitor (TCSC) dengan menggunakan kontrol impedansi dan kontrol PI, permasalahannya dibatasi pada :

- 1 Simulasi dari rangkaian TCSC dengan kontrol PI dan pengatur impedansi.
- 2 Analisa reaktansi TCSC pada kondisi steady state.
- 3 Respon Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) dengan menggunakan pengatur impedansi dan kontrol PI.
- 4 Daya yang disalurkan pada sistem rangkain dengan adanya TCSC.
- 5 Power faktor dari suatu jaringan transmisi dengan adanya TCSC.

1.5. Metodologi

Metodologi yang dipakai adalah menganalisa dan membandingkan hasil dari simulasi (pemodelan) antara teknik pengatur impedansi dengan kontrol PI. Hasil yang dianalisa adalah reaktansi TCSC, daya yang disalurkan pada jaringan serta power faktor yang ada pada sistem tersebut. Dari sinyal – sinyal tersebut dapat diketahui perbedaan kecepatan dan

ketepatan respon untuk mencapai suatu keadaan steady state dari suatu TCSC yang menggunakan teknik pengatur impedansi dengan teknik kontrol PI.

1.6. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika pembahasan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan dan relevansi, pembatasan masalah, metodologi, dan sistematika penulisan.

BAB II KOMPENSASI SERI PADA TRANSMISI

Menjelaskan tentang Kompensator seri, Thyristor Controlled Reactor (TCR), Thyristor Controlled Series Capacitor, cara kerja dan macam-macam mode operasi TCSC.

BAB III THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPASITOR

Menjelaskan tentang teori thyristor controlled series capacitor, prinsip kerja controller, faktor daya dan persamaan daya pada saluran transmisi.

BAB IV ANALISA DAN SIMULASI

Berisi Pemodelan system dari Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) dengan menggunakan pengatur impedansi dan kontrol PI yang kemudian hasilnya akan dibandingkan.

BAB V PENUTUP

Berisi tentang kesimpulan dan saran.

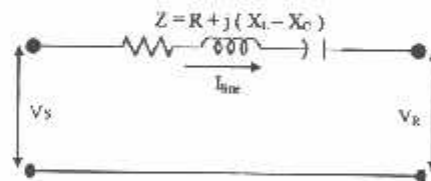
BAB II

KOMPENSASI SERI PADA TRANSMISI

2.1. Kompensator Seri

Kompensator seri pada transmisi biasanya digunakan sebagai kompensasi daya reaktif pada saluran transmisi. Kompensator seri ini pada mulanya menggunakan kapasitor yang dipasang seri dengan saluran transmisi. Dengan adanya kompensasi seri ini reaktansi saluran transmisi dapat dikurangi, sehingga dapat meningkatkan transfer daya yang ditransmisikan.

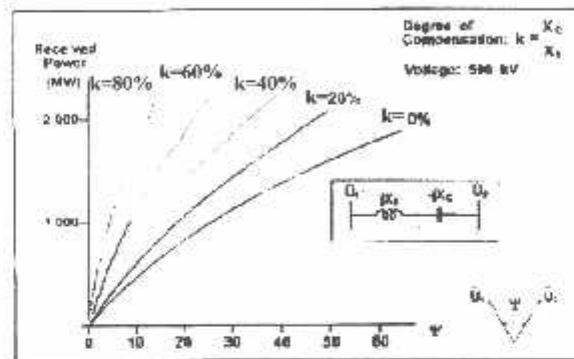
Dari gambar 2.1 ditunjukkan kapasitor yang terhubung seri dengan saluran yang memiliki reaktansi induktif. Kapasitor seri memiliki reaktansi negatif, sedangkan pada saluran memiliki reaktansi positif (induktif), sehingga kapasitor berfungsi sebagai kompensator reaktansi induktif. Hal ini menyebabkan drop tegangan yang diakibatkan oleh reaktansi induktif pada saluran dapat diperkecil.



Gambar 2.1
Penggunaan Kapasitor Seri pada Saluran

Kompensasi seri akan menimbulkan pengaruh pada saluran transmisi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Konstanta k merupakan derajat kompensasi dari kapasitor seri yang besarnya ditentukan oleh reaktansi

kapasitif (X_C) dan reaktansi induktif dari saluran transmisi (X_L). Dan ψ adalah perbedaan sudut antara tegangan sisi kirim dengan tegangan sisi terima pada suatu saluran transmisi.



Gambar 2.2
Pengaruh adanya kompensasi seri

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa daya yang ditransmisikan akan semakin meningkat jika prosentase derajat kompensasi dinaikkan, sehingga perbedaan sudut (ψ) antara kedua sisi tegangan pada saluran transmisi akan bertambah kecil jika kompensasi dinaikkan.

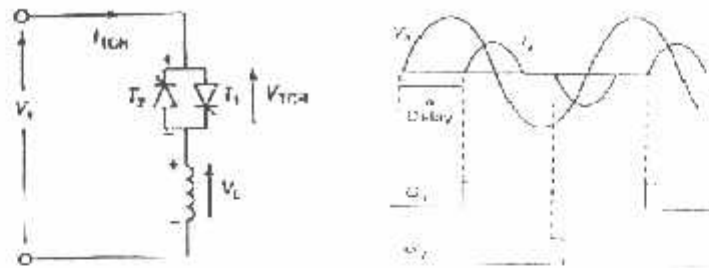
Keuntungan – keuntungan lain dengan penggunaan kompensator seri antara lain :

1. Dapat meningkatkan kestabilan sistem
2. Menurunkan drop tegangan pada saluran transmisi
3. Menurunkan rugi – rugi daya pada saluran transmisi
4. Meningkatkan transfer daya pada saluran transmisi

Kapasitor seri konvensional (Fixed Capacitor) sebagai kompensasi seri pada saluran transmisi masih dianggap kurang fleksibel karena memiliki rating yang sangat terbatas. Karena itu mulai dilakukan pengembangan dari kapasitor seri tersebut, salah satunya dengan adanya Controllable Series Compensation (CSC) yang dilengkapi dengan komponen power elektronik yaitu, thyristor. Untuk mengatur harga impedansi dari kompensasi seri tersebut yaitu dengan mengatur sudut penyalan α pada Thyristor.

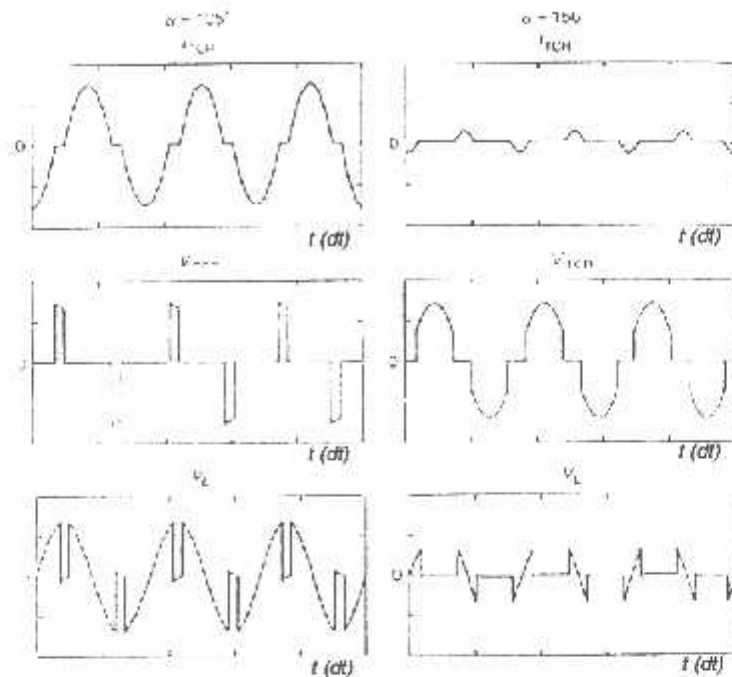
2.2. Thyristor Controlled Reactor (TCR)

TCR merupakan salah satu bagian terpenting dalam suatu rangkaian TCSC, sehingga jika dihubungkan paralel dengan kapasitor maka akan dapat dipakai untuk mengatur daya reaktif (lagging ataupun leading) secara kontinu. Rangkaian dasar TCR ini terdiri atas induktor yang dihubungkan secara seri dengan thyristor seperti ditunjukkan pada gambar 2.3. Thyristor (T_1, T_2) yang terhubung anti paralel ini bekerja seperti bidirectional switch dimana thyristor T_1 akan berkonduksi pada setengah gelombang positif dan thyristor T_2 akan berkonduksi pada setengah gelombang negatif.



Gambar 2.3
Rangkaian TCR

Range untuk pengaturan sudut penyalaan (α) mulai dari 90° sampai 180° . Pada sudut penyalaan 90° menyebabkan thyristor akan berkonduksi secara penuh. Dan pada sudut penyalaan 180° thyristor tidak berkonduksi atau dalam kondisi blocked mode. Pada gambar 2.4 dapat dilihat thyristor di trigger dengan sudut penyalaan diantara 90° sampai 180° .



Gambar 2.4..
Arus dan tegangan pada TCR

2.3. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

FACTS (Flexible AC Transmission System) devices yang secara umum kita ketahui adalah peralatan baru untuk memperbaiki sistem transmisi. Sistem transmisi akan mengalami perubahan dan restrukturisasi secara terus menerus. Karena itu permasalahan yang ada pada sistem transmisi bertambah lebih berat, untuk itu FACTS devices diharapkan dapat mengatasi permasalahan yang timbul pada transmisi.

TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) merupakan salah satu jenis dari FACTS devices. TCSC ini merupakan perluasan dari kapasitor

seri sederhana melalui penambahan induktor terkontrol yang dikontrol dengan thyristor. Penempatan sebuah reaktor kontrol secara paralel dengan sebuah kapasitor seri memungkinkan kesinambungan dan perubahan sistem secara cepat dan tepat.

2.3.1. Keuntungan – keuntungan TCSC

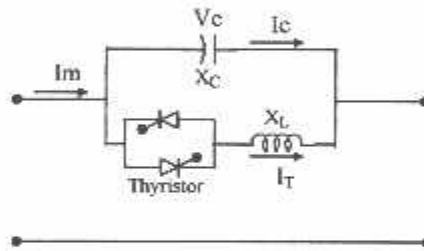
Penggunaan thyristor controlled series capacitor (TCSC) memiliki beberapa keuntungan seperti sebagai berikut :

1. Dapat mengontrol level kompensasi pada saluran transmisi secara kontinue dan cepat,
 2. Dapat mengoptimalkan aliran daya pada saluran transmisi.
 3. Dapat meredam osilasi pada lokal area maupun inter area.
 4. Dapat meredam osilasi akibat subsynchronous resonance. Dimana pada frekwensi subsynchronous, reaktansi TCSC akan bersifat resistif - induktif, subsynchronous resonance tidak boleh dibiarkan terjadi terlalu lama untuk itu harus diredam.
 5. TCSC dapat dipakai untuk menaikkan tegangan, dimana TCSC yang terdapat kapasitor seri dapat bersifat reaktansi kapasitif yang dapat mekompensasi reaktansi saluran sehingga regulasi tegangan dapat dikurangi.
 6. Dapat memperkecil arus hubung singkat. Pada saat terjadi hubung singkat TCSC dapat berubah dari bentuk controllable capacitance ke
-

bentuk controllable inductance, sehingga besarnya arus hubung singkat dapat dikurangi.

2.3.2. Rangkaian Dasar TCSC

Pada gambar 2.5 dapat dilihat rangkaian dasar dari pada TCSC yang terdiri atas kapasitor seri yang terhubung paralel dengan induktor. Induktor ini memiliki harga reaktansi (X_L) yang dapat diubah-ubah, sehingga dapat menentukan reaktansi total dari TCSC itu sendiri. Perubahan nilai reaktansi dari pada TCSC dapat ditentukan dengan mengubah sudut penyalan (α) thyristor yang terhubung dengan induktor.



Gambar 2.5
Rangkaian dasar TCSC

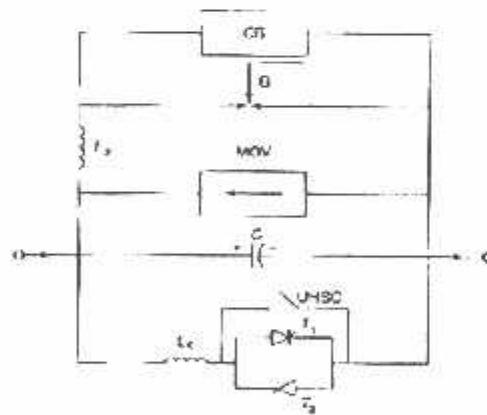
Namun secara praktis modul dari pada TCSC selalu dilengkapi dengan peralatan pengaman yang biasanya dipasang dengan kapasitor seri, seperti yang terlihat pada gambar 2.6.

Metal Oxide Varistor (MOV) yang pada dasarnya berupa non linear resistor dihubungkan secara paralel dengan kapasitor seri yang ada pada TCSC untuk menghindari terjadinya overvoltage pada kapasitor. Fungsi

dari MOV tidak hanya sebagai pengaman tegangan lebih tetapi juga sebagai indikator apabila terjadi suatu gangguan dan juga dapat dipakai untuk meningkatkan kestabilan sistem.

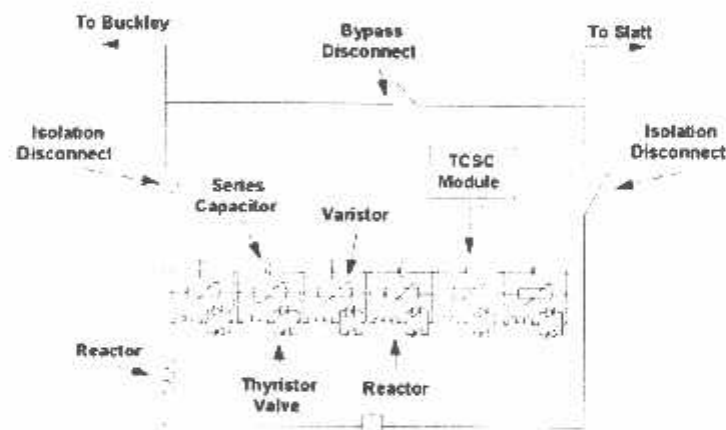
Selain MOV juga terdapat circuit breaker (CB) yang akan me-bypass kapasitor jika terjadi gangguan atau terjadi gangguan pada peralatan. Dan juga terdapat induktor pembatas arus (L_d) yang berfungsi untuk membatasi frekwensi dan arus yang melewati kapasitor pada mode operasi capasitor bypass.

Jika TCSC bekerja pada full konduksi maka diperlukan UHSC (Ultra High Speed Contact) untuk mengurangi losses yang di akibatkan karena konduksi tersebut. UHSC ini tidak megakibatkan losses sama halnya dengan circuit breaker, hanya saja UHSC ini dapat meng-handle pada berbagai macam operasi switching. Kontak metalik ini akan menutup dengan cepat setelah valve thyristor "on", dan akan terbuka dengan cepat sebelum valve thyristor "off".



Gambar 2.6
Modul praktis TCSC

Secara praktis biasanya sistem TCSC di kombinasikan secara cascade yang terdiri atas beberapa modul TCSC dan disertai dengan fixed capacitor (C_f). Fixed capacitor ini dipakai untuk memperkecil kerugian. Konsep dari pada sistem TCSC yang terdiri dari beberapa modul TCSC dapat dilihat seperti pada gambar 2.7. Nilai dari pada masing-masing kapasitor (C_1, C_2, \dots, C_n) berbeda – beda, hal ini ditujukan untuk mendapatkan range yang lebih lebar di dalam pengaturan reaktansi. Nilai dari induktor yang terhubung seri dengan thyristor dibagi menjadi dua untuk melindungi apabila terjadi hubung singkat pada thyristor.



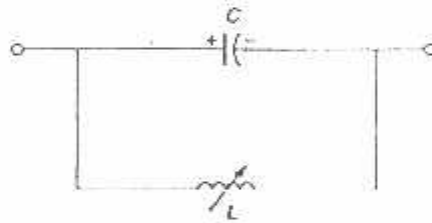
Gambar 2.7
Model sistem TCSC terhubung secara cascade

2.4. Cara Kerja TCSC

2.4.1. Prinsip Dasar TCSC

TCSC merupakan reaktansi kapasitif seri terkontrol yang dapat mengatur aliran daya secara kontinu dengan range yang lebih lebar. Prinsip kompensasi seri variabel ini sebenarnya sangat sederhana yaitu dengan cara menaikkan frekwensi fundamental dari tegangan pada fixed capacitor (FC) di suatu saluran yang terkompensasi seri tersebut dengan mengubah besarnya sudut penyalaan (α). Perubahan tegangan ini menentukan harga efektif dari reaktansi seri kapasitif.

Untuk mempermudah dalam memahami prinsip kerja dari TCSC ini dapat dilakukan dengan menganalisa suatu rangkaian yang terdiri dari variabel induktor yang terhubung paralel dengan fixed capacitor (FC) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8
Variabel induktor terhubung paralel dengan kapasitor

Impedansi ekivalen Z_{eq} dari rangkaian LC diatas adalah sebagai berikut :

$$Z_{eq} = \left(j \frac{1}{\omega C} \right) \parallel (j\omega L) = -j \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} \quad (2.1)$$

Impedansi dari FC sendiri adalah : $-j(1/\omega C)$

- ✓ Jika $\omega C - (1/\omega L) > 0$ atau $\omega L > (1/\omega C)$, maka reaktansi FC lebih kecil dari pada reaktansi variabel reaktor yang terhubung paralel dengan FC. Dalam hal ini akan didapatkan reaktansi kapasitif variabel. Selain itu induktor tersebut menaikkan reaktansi ekivalen kapasitif diatas harga fixed capacitor itu sendiri.
- ✓ Jika $\omega C - (1/\omega L) = 0$, maka akan terjadi resonansi yang menyebabkan impedansi kapasitif menjadi tak terhingga, kondisi semacam ini tidak diinginkan.
- ✓ Jika $\omega C - (1/\omega L) < 0$, maka kombinasi rangkaian LC akan bersifat induktif yang nilainya melebihi fixed induktor itu sendiri. Kondisi seperti ini biasanya disebut sebagai inductive vernier mode pada mode operasi TCSC.

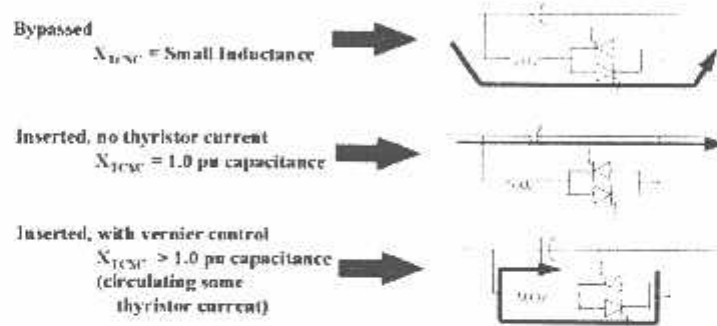
Pada mode variabel capacitive ini reaktansi induktif akan semakin bertambah sedangkan reaktansi kapasitif akan semakin berkurang. Reaktansi kapasitif ekivalen minimum didapatkan pada saat harga reaktansi induktif sangat besar atau ketika variabel induktor dalam keadaan open circuit sehingga pada keadaan semacam ini nilainya sama dengan reaktansi FC itu sendiri.

Karakteristik dari TCSC ini sendiri hampir sama dengan kombinasi rangkaian LC paralel. Perbedaanya adalah pada rangkaian LC paralel ini bentuk gelombang arus dan tegangannya adalah sinusoidal murni sehingga tidak dilakukan analisis harmonisa, sedangkan pada TCSC

bentuk gelombang arus dan tegangan tidak murni sinusoidal. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh switching pada thyristor yang mengakibatkan bentuk gelombang arus dan tegangan menjadi terdistorsi.

2.4.2. Mode Operasi TCSC

Pada pengoperasiannya, TCSC memiliki beberapa macam mode operasi, dan bentuk dari operasi tersebut dapat dilihat seperti pada gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.9.
Mode Operasi TCSC

* Bypassed Thyristor mode

Pada bypassed mode ini kedua thyristor terkonduksi penuh tanpa delay dengan sudut konduksi 180° , sehingga sebagian besar arus line mengalir melalui induktor, sehingga TCSC menyerupai sebuah induktor kecil. Mode operasi ini bisa disebut sebagai *thyristor switched reactor* (TSR) mode. Pada mode ini arus dan tegangan berbentuk sinusoidal murni. Arus kapasitor $i_C(t)$ mendahului 90° dan arus induktor $i_L(t)$ tertinggal 90° terhadap tegangan sumber $V_{line}(t)$.

*** Blocked Thyristor mode**

Pada mode ini kedua thyristor dalam kondisi tidak konduksi sehingga arus saluran seluruhnya mengalir melewati kapasitor dalam kondisi tersebut TCSC berfungsi sepenuhnya sebagai kompensator seri. Sehingga reaktansi ekuivalen dari pada TCSC adalah sama dengan reaktansi dari fixed kapasitor (FC).

*** Capacitive Vernier mode**

Pada mode ini arus yang mengalir melalui induktor lebih kecil dibanding dengan arus yang mengalir pada kapasitor . Dimana arus induktor berlawanan dengan arus kapasitor sehingga menyebabkan sirkulasi aliran arus pada TCSC. Sirkulasi arus tersebut akan menaikkan tegangan pada kapasitor, sehingga secara efektif juga akan menaikkan reaktansi ekuivalen kapasitif dan level kompensasi seri pada saluran. Dengan kata lain pada capacitive vernier mode TCSC bersifat kapasitif. Untuk membatasi kemungkinan terjadinya resonansi, maka TCSC dioperasikan dengan periode sudut penyalan antara $\alpha_{min} < \alpha < 180^\circ$. Jika arus loop akan bertambah besar maka sudut penyalan α akan semakin kecil dari 180° sampai α_{min} . Reaktansi maksimum TCSC diperoleh apabila $\alpha = \alpha_{min}$, yang biasanya besarnya reaktansi TCSC sama dengan dua atau tiga kali dari pada harga reaktansi kapasitor (FC) pada frekwensi fundamental.

Berdasarkan gambar 2.10 analisis mengenai tegangan dan arus TCSC pada saat capacitive vernier mode dapat dikelompokkan menjadi 2, yaitu :

1. Periode $-\beta < \omega t < \beta$, pada periode ini thyristor sedang konduksi
2. Periode $\beta < \omega t < 180^\circ - \beta$, pada periode ini thyristor tidak konduksi



Gambar 2.10
Bentuk gelombang untuk analisis capacitive vernier mode

* Inductive Vernier Mode

Mode ini merupakan kebalikan dari mode capacitive vernier, dimana arus yang melalui induktor lebih besar dibandingkan dengan arus yang mengalir melalui kapasitor, sehingga pada mode ini TCSC bersifat induktif. Pada mode vernier seperti yang telah disebutkan diatas, TCSC dapat mengatur reaktansinya menjadi kapasitif maupun induktif secara kontinu. Hal tersebut dapat dilakukan dengan mengubah sudut penyalan α pada range periode yang telah ditentukan.

Bagaimanapun juga perubahan reaktansi ekivalen TCSC dari kapasitif ke induktif atau sebaliknya biasanya tidak dilakukan, hal ini disebabkan karena terdapat daerah resonansi diantara dua mode operasi vernier tersebut

Berdasarkan pada macam - macam mode operasi thyristor tersebut maka didapatkan 2 macam bentuk TCSC, yaitu :

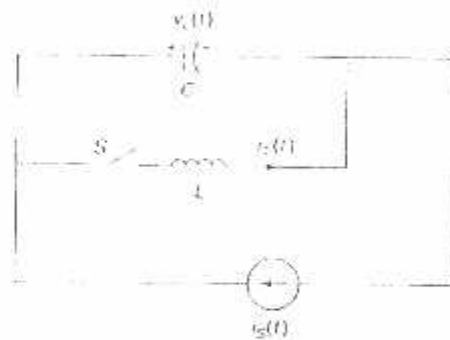
1. Thyristor switched series capasitor (TSSC) yang hanya mengontrol reaktansi kapasitif.
 2. Thyristor controlled series capasitor (TCSC), yang dapat mengontrol reaktansi kapasitif maupun reaktansi induktif.
-

BAB III

THYRISTOR CONTROLLED SERIES CAPASITOR

3.1 Analisa TCSC

Untuk menganalisa operasi dari TCSC pada vernier control mode ditunjukkan berdasarkan rangkaian TCSC sederhana seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.1. pada rangkaian tersebut arus saluran transmisi diasumsikan sebagai independent input variabel dan dimodelkan sebagai sumber arus, $I_s(t)$. Bentuk gelombang arus saluran juga diasumsikan murni sinusoidal, yang didapat pada pengukuran dimana harmonisa relatif kecil. Akan tetapi pada kenyataannya harmonisa yang timbul akibat adanya proses switching ini harus diperhitungkan.



Gambar 3.1
Rangkaian sederhana TCSC

Arus pada kapasitor adalah sebagai berikut :

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_s(t) - i_r(t) \cdot u \quad 3.1$$

Variabel switching ketika valve thyristor dalam keadaan konduksi adalah $u = 1$, yang terjadi pada saat switch S tertutup. Sebaliknya ketika thyristor dalam kondisi tidak konduksi variabel switchingnya adalah $u = 0$, dalam hal ini switch S dalam keadaan open

Arus yang mengalir pada thyristor adalah sebagai berikut :

$$\frac{I di_r}{dt} = v_c \cdot u \quad 3.2$$

Arus pada saluran adalah :

$$i_s(t) = I_m \cos \omega t \quad 3.3$$

Persamaan 3.1 dan persamaan 3.5 dapat diselesaikan dengan mengamati switching secara instants. Pada pengoperasian TCSC, valve dari thyristor disulut dua kali untuk tiap cycle dari arus saluran secara instants pada t_1 dan t_3 ,

$$t_1 = -\frac{\beta}{\omega} \quad 3.4$$

$$t_3 = \frac{\pi - \beta}{\omega} \quad 3.5$$

β merupakan sudut sebelum tegangan forward menjadi nol

$$\beta = \pi - \alpha \quad 0 < \beta < \beta_{\max} \quad 3.6$$

Sudut penyalan α dihasilkan dari sinyal referensi yang sefasa dengan tegangan capacitor. Switch S thyristor akan off secara instant pada t_2 dan t_4 .

$$t_2 = t_1 + \frac{\sigma}{\omega} \quad 3.7$$

$$t_4 = t_3 + \frac{\sigma}{\omega} \quad 3.8$$

dimana σ adalah sudut konduksi yang diasumsikan sama dengan dua gelombang positif dan negatif saat konduksi,

$$\sigma = 2\beta \quad 3.9$$

Untuk mendapatkan arus thyristor $I(\tau)$ TCSC pada saat steady state maka dipakai persamaan 3.1 dan 3.3 sehingga diperoleh,

$$i_r(t) = \frac{k^2}{k^2 - 1} \text{Im} \left(\cos \omega t - \frac{\cos \beta}{\cos k\beta} \cos \omega_c t \right); \quad -\beta \leq \omega t \leq \beta \quad 3.10$$

dimana,

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad 3.11$$

$$k = \frac{\omega_c}{\omega} = \sqrt{\frac{1}{\omega L} \cdot \frac{1}{\omega C}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad 3.12$$

X_c merupakan reaktansi nominal dari fixed kapasitor, sehingga tegangan kapasitor pada kondisi steady state saat instant $\omega t = -\beta$ adalah sebagai berikut :

$$V_{C1} = \frac{\text{Im } X_c}{k^2 - 1} (\sin \beta - k \cos \beta \tan \beta) \quad 3.13$$

pada saat $\omega t = \beta$, $i_r = 0$, maka tegangan kapasitor adalah ,

$$V_C(\omega t = \beta) = V_{C2} - V_{C1} \quad 3.14$$

Sehingga tegangan kapasitor untuk periode $-\beta \leq \omega t \leq \beta$ didapatkan sebagai berikut :

$$V_c(t) = \frac{I_m X_c}{k^2 - 1} \left(-\sin \omega t + k \frac{\cos \beta}{\cos k\beta} \sin \omega_c t \right) \quad 3.15$$

Untuk periode $\beta < \omega t < \pi - \beta$, tegangan kapasitor adalah sebagai berikut :

$$V_c(t) = V_{c2} + I_m X_c (\sin \omega t - \sin \beta) \quad 3.16$$

karena tegangan kapasitor tidak sinusoidal maka V_c memiliki fungsi ganjil pada $\omega t = 0$, sehingga didapatkan komponen fundamental V_{CF} , seperti dibawah ini :

$$V_{CF} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} V_c(t) \sin \omega t d(\omega t) \quad 3.17$$

Reaktansi ekivalen TCSC didapatkan melalui pembagian tegangan (V_{CF}) dengan arus saluran I_m .

$$X_{TC} = \frac{V_{CF}}{I_m} = X_C - \frac{X_C^2}{(X_C - X_L)} \frac{2\beta + \sin 2\beta}{\pi} + \frac{4X_C^2}{(X_C - X_L)(k^2 - 1)} \frac{\cos^2 \beta (k \tan k\beta - \tan \beta)}{\pi} \quad 3.18$$

Reaktansi ekivalen TCSC sebagai fungsi sudut penyalaan α adalah sesuai dengan persamaan 3.19 :

$$X_{TC} = \frac{1}{\omega C} - \frac{k^2(2\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha)}{\pi \omega C(k^2 - 1)} + \frac{4k^2}{\pi \omega C(k^2 - 1)^2} \cos^2 \alpha [k \tan k(\pi - \alpha) + \tan \alpha] \quad 3.19$$

Reaktansi TCSC jika dibawa dalam satuan per-unit (pu), ditunjukkan sebagai berikut ($X_{pu} = (X_{TCSC}/X_C)$)

$$X_{pu} = 1 - \frac{X_C}{(X_C - X_L)} \frac{\sigma + \sin \sigma}{\pi} + \frac{4X_C}{(X_C - X_L)(k^2 - 1)} \frac{\cos^2(\sigma/2) [k \tan(k\sigma/2) - \tan(\sigma/2)]}{\pi} \quad 3.20$$

Reaktansi ekivalen TCSC (pu) sebagai fungsi sudut konduksi β sesuai pada persamaan 3.21 :

$$X_{\text{eq}(pu)} = 1 - \frac{k^2(2\beta + \sin 2\beta)}{\pi(k^2 - 1)} + \frac{4k^2 \cos^2 \beta}{\pi(k^2 - 1)^2} (k \tan k\beta - \tan \beta) \quad 3.21$$

Reaktansi per-unit TCSC sebagai fungsi sudut penyalan α dapat dilihat seperti pada gambar 3.2. Dari persamaan 3.18 dapat diketahui bahwa resonansi paralel terjadi diantara reaktansi kapasitif (X_c) dan reaktansi induktif (X_L).

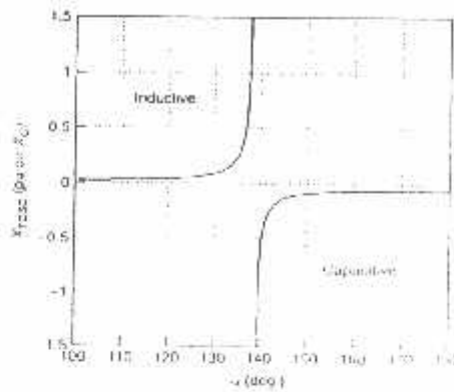
Kondisi resonansi ini berhubungan dengan besarnya sudut penyalan α ataupun sudut konduksi β , seperti yang ditunjukkan pada persamaan dibawah ini :

$$\alpha_{\text{res}} = \pi - (2m - 1) \frac{\pi\omega}{2\omega_r} ; \quad m=1,2,\dots \quad 3.22$$

atau,

$$\beta_{\text{res}} = (2m - 1) \frac{\pi\omega}{2\omega_r} ; \quad m=1,2,\dots \quad 3.23$$

Kondisi resonansi paralel dapat dikurangi dengan cara menentukan parameter $k = (\omega_r/\omega)$ secara tepat pada range $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ atau $0^\circ < \beta < 90^\circ$.



Gambar 3.2

Variasi reaktansi TCSC berdasarkan sudut penyalan (α)

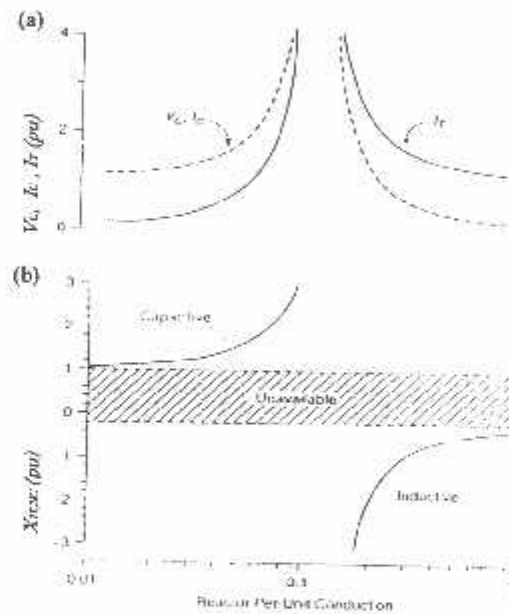
Pada saat terjadi resonansi TCSC memiliki impedansi yang sangat besar dan menyebabkan drop tegangan yang cukup besar. Kondisi resonansi tersebut dapat dihindari dengan membatasi sudut penyalan (α).

Karena TCSC pada umumnya adalah sebagai kapasitif device maka ditentukan bahwa reaktansi yang bernilai positif adalah bersifat kapasitif dan reaktansi yang bernilai negatif adalah bersifat induktif. Sedangkan untuk analisis load flow merupakan kebalikannya, yaitu reaktansi positif adalah bersifat induktif dan reaktansi negatif adalah bersifat kapasitif.

- $X_{TCSC} = +1$ pu thyristor tidak berkonduksi
- $X_{TCSC} = +2$ pu thyristor berkonduksi sehingga menyebabkan adanya sirkulasi arus pada FC – TCR yang menghasilkan tegangan 2.0 pu. I_{line} mendahului (leading) terhadap tegangan sebesar 90°. Sehingga TCSC bersifat kapasitif.
- $X_{TCSC} = -1$ pu thyristor berkonduksi sehingga menyebabkan adanya sirkulasi arus pada FC – TCR yang menghasilkan tegangan

1.0 pu. I_{line} tertinggal (lagging) terhadap tegangan sebesar 90° . Sehingga TCSC bersifat induktif.

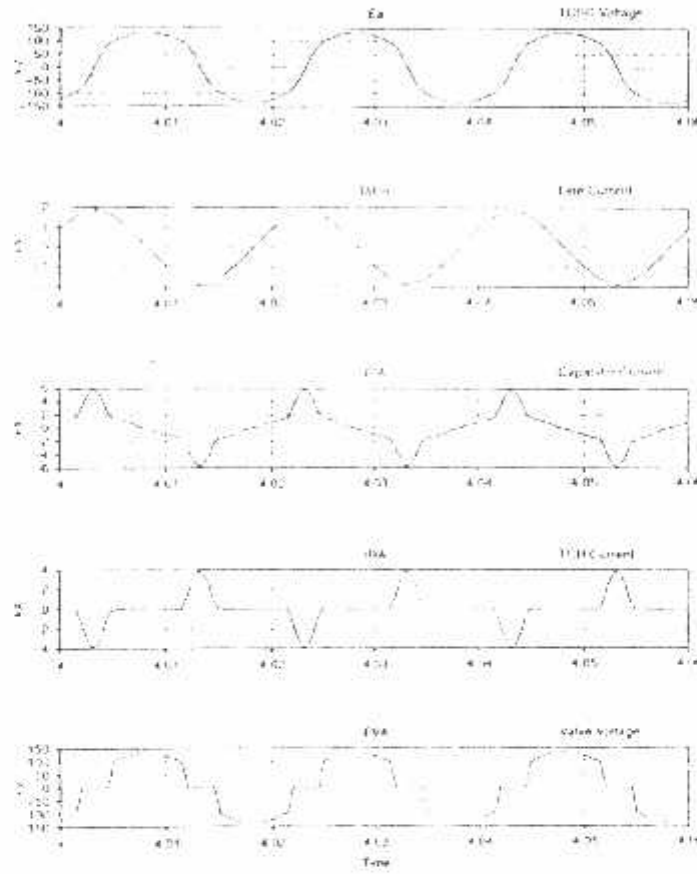
Tegangan rms kapasitor V_c , arus rms kapasitor I_c , dan arus rms thyristor ditunjukkan pada gambar 3.3 (a) sebagai fungsi konduksi reaktor per-unit. Pada kapasitif mode $I_c > I_T$, dan pada induktif mode $I_c < I_T$. Arus sirkulasi yang dihasilkan pada kapasitif mode menyebabkan arus kapasitor, tegangan kapasitor dan reaktansi kapasitif menjadi naik dengan semakin meningkatnya konduksi pada thyristor. Hubungan antara reaktansi TCSC dengan konduksi reaktor per-unit ditunjukkan juga pada gambar 3.3 (b).



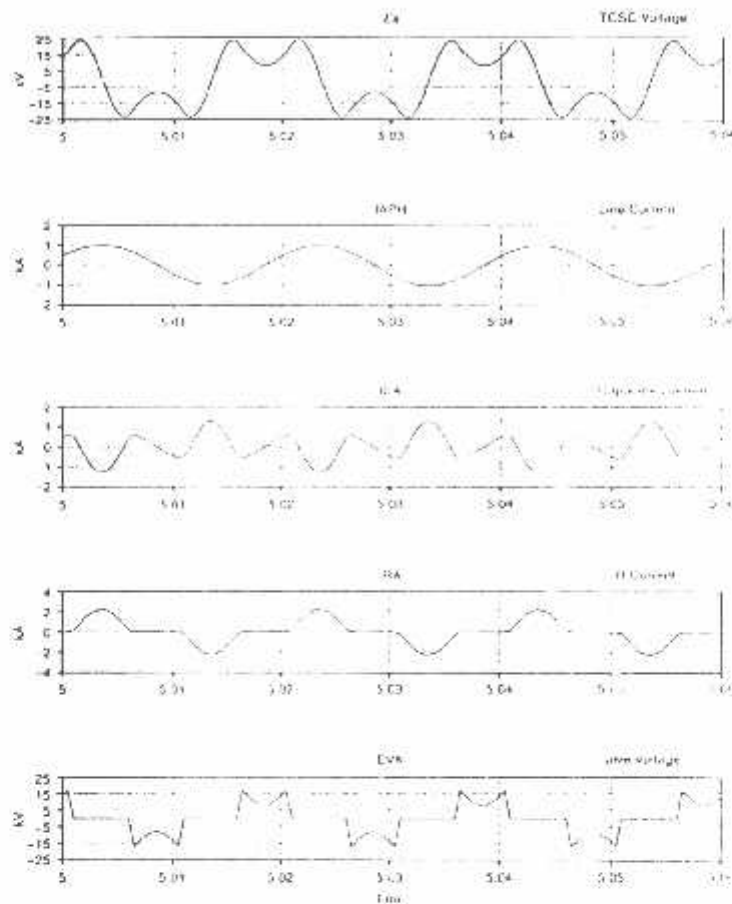
Gambar 3.3

Variasi tegangan, arus dan reaktansi TCSC dengan per-unit TCR konduksi: (a) Arus kapasitif (pu), tegangan TCSC (pu) ; (b) X_{TCSC} (pu) .

Bentuk tegangan TCSC, arus line, arus kapasitor, arus TCR dan tegangan valve pada mode kapasitif vernier mode dan induktif vernier mode dapat dilihat pada gambar 3.4 dan 3.5.



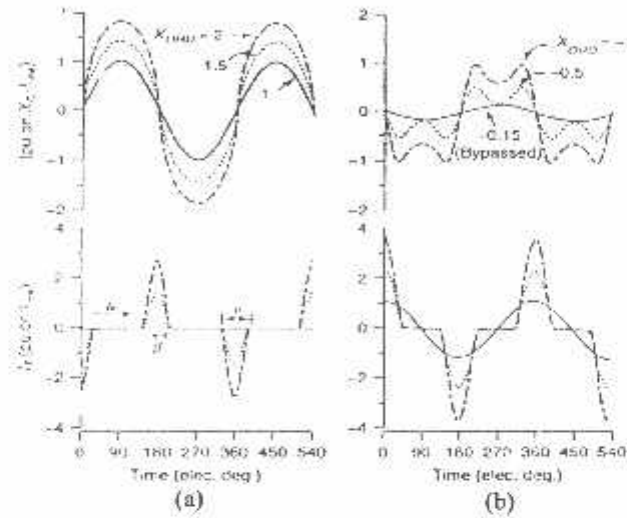
Gambar 3.4
Bentuk gelombang pada kapasitif vernier mode ($\alpha=150^\circ$)



Gambar 3.5
Bentuk gelombang pada induktif vernier mode ($\alpha=130^\circ$)

Pada titik - titik operasi yang berbeda yaitu pada daerah kapasitif dan induktif ditunjukkan pada gambar 3.6 (a) dan 3.6 (b) [8]. Pada gambar 3.6 (a) garis yang tidak putus - putus menunjukkan bahwa thyristor pada kondisi blocked mode dengan $X_{TCSC} = 1$ pu, untuk garis putus - putus menunjukkan harga arus thyristor, dengan $X_{TCSC} = 1.5$ pu dan 2 pu. Pada gambar 3.6 (b) garis yang tidak terputus menunjukkan TCSC pada bypassed

thyristor mode, dengan $X_{TCSC} = -0.15$ pu, sedangkan untuk garis yang terputus menunjukkan level arus thyristor dengan $X_{TCSC} = -0.5$ pu dan -1 pu. [8]



Gambar 3.6
Variasi dari tegangan TCSC dan arus thyristor pada mode operasi:
(a) kapasitif, (b) induktif.

3.2. Prinsip Kerja Controller

Berdasarkan cara kerjanya jenis dari controller dibedakan menjadi dua macam yaitu, on – off controller yang hanya bekerja pada dua posisi on dan off serta controller yang bekerja secara kontinu. Secara kontinu artinya control valve bekerja dari titik 0 % sampai ke titik 100%. Jenis ini lebih banyak digunakan pada sistem pengendalian proses karena banyak operasi proses yang tidak dapat mentolerir fluktuasi *process variable* yang besar. Ada tiga macam controller/pengendali yang bekerja secara kontinu, yaitu :

1. Pengendali proposional (P)
2. Pengendali integral (I)
3. Pengendali Diferensial (D)

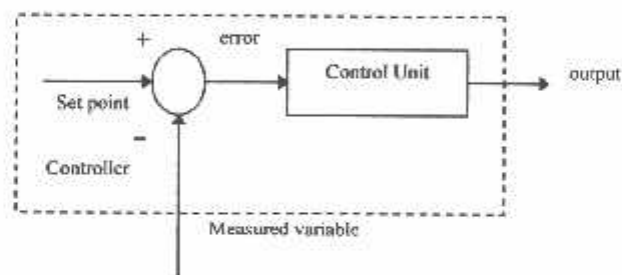
Karena kelebihan dan kekurangan ketiga controller tersebut maka seringkali dipakai dalam bentuk kombinasi, yaitu P+I disingkat (PI), P+D disingkat (PD), dan P+I+D disingkat (PID). Ketiga jenis pengendali ini memberikan respon yang berbeda – beda pada proses orde satu, proses orde dua, orde banyak dan proses dengan dead time.

Pada dasarnya fungsi dari controller terbagi dalam dua tahap, yaitu membandingkan dan menghitung. Kedua fungsi tersebut di dalam blok diagram diwakili oleh kerja dari *summing junction* dan kerja unit control. Seperti yang terlihat pada gambar 2.4. *summing junction* berfungsi untuk membandingkan *measured variable* dengan *set point* dan fungsi dari unit control adalah untuk menghitung besar kecilnya koreksi yang diperlukan.

Perbandingan itu sendiri dilakukan dengan cara mengurangi besaran set point dengan besaran yang terukur (*measurement variable*), yang kemudian hasilnya disebut dengan *error*. Karena nilai dari set point bisa lebih kecil atau lebih besar dari besaran yang terukur, maka nilai error bisa negatif ataupun positif. Berdasarkan besarnya error tersebut maka unit control melakukan penghitungan besarnya koreksi. Jadi error adalah input unit control dan *manipulated variable* adalah output unit control.

Besarnya manipulated variable dihitung berdasarkan besarnya error dan transfer function unit control. Bentuk transfer function unit control adalah tergantung pada jenis dari controller (P, I, PI , PD atau PID).

Dari gambar 3.7 dapat dilihat bahwa harga dari set point diproduksi dari controller itu sendiri yang besarnya dapat diset dengan memutar knob yang ada pada controller. Input dari pada Controller tersebut berasal dari sinyal measurement variable dan outputnya berupa sinyal manipulated variable yang dihasilkan oleh control unit.



Gambar 3.7
Diagram blok controller

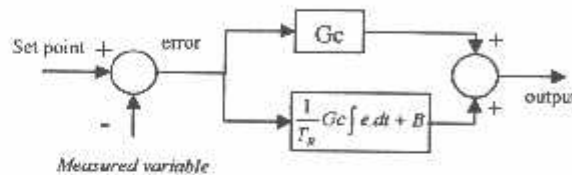
3.2.1. PI Controller

PI controller merupakan gabungan antara 2 buah controller yaitu, Proporsional dan Integral controller. Kombinasi antara 2 controller ini dimaksudkan untuk menutupi masing – masing kelemahan yang dimiliki oleh proporsional dan integral controller .

Bentuk transfer function pengendali PI adalah sebagai berikut :

$$O = G_c \left(e + \frac{1}{T_i} \int e \cdot dt \right) \quad 3.24$$

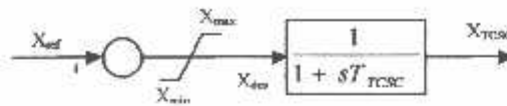
Blok diagram gabungan antara kontrol P (proporsional) dan I (integral) adalah sebagai berikut [3]:



Gambar 3.8
Blok diagram PI Controller

3.2.2. Pengatur Impedansi

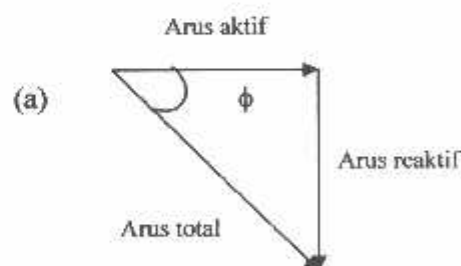
Alat pengatur impedansi adalah pengaturan dari TCSC yang paling dasar dan sederhana, yang biasanya digunakan untuk mengontrol aliran daya pada transmisi. Blok diagram dari pengatur impedansi ditunjukkan pada gambar 3.9. Level kompensasi seri ataupun aliran daya yang diinginkan dapat diperoleh dengan memasukan referensi input (X_{ref}) pada kontroler tersebut. Pada model kontroler ini terdapat delay block yang pada umumnya memiliki waktu 15 ms. Output dari kontroler ini di linearisasi untuk mendapatkan sudut penyalaan, kemudian sinyal sudut penyalaan tersebut di teruskan ke pembangkit pulsa sudut penyalaan. Dari pembangkit pulsa tersebut akan didapat pulsa untuk menyulut gate thyristor agar berkonduksi.

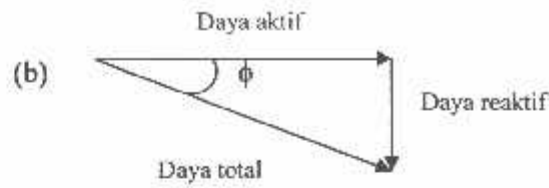


Gambar 3.9
Kontrol Impedansi TCSC

3.3. Faktor Daya

Suatu peralatan daya memerlukan dua omponen arus, yaitu arus yang menghasilkan daya aktif dan arus yang menghasilkan daya reaktif / arus magnetisasi. Arus yang menghasilkan daya aktif adalah arus yang dikonversikan oleh peralatan menjadi kerja, umumnya dalam bentuk panas, cahaya dan daya mekanik. Satuan daya kerja yang dihasilkan adalah Watt. Sedangkan arus magnetisasi juga disebut wattless / reaktif, adalah arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks untuk pengoperasian peralatan elektromagnetis. Dengan arus magnetis energi mengalir melalui trafo atau menembus celah udara pada motor induksi. Daya reaktif yang dihasilkan diukur dalam satuan VAR. Gambar 3.10 adalah menunjukkan fasor arus dan daya.





Gambar 3.10
Fasor rangkaian arus bolak balik : (a) arus, (b) Daya

Dengan penjumlahan secara vektoris didapatkan persamaan arus dan daya sebagai berikut :

$$I_{total} = \sqrt{(I_{aktif})^2 + (I_{reaktif})^2} \quad 3.25$$

$$I_{total} = \sqrt{(I \cos \phi)^2 + (I \sin \phi)^2} \quad 3.26$$

$$S = \sqrt{(P)^2 + (Q)^2} \quad 3.27$$

$$S = \sqrt{(VI \cos \phi)^2 + (VI \sin \phi)^2} \quad 3.28$$

dimana : S = Daya nyata (KVA)

P = Daya aktif (KW)

Q = Daya reaktif (KVAR)

Definisi faktor daya secara umum adalah perbandingan antara daya aktif dan daya total (KW / KVA), atau definisi lain menyebutkan bahwa faktor daya adalah sebagai harga cosinus dari sudut beda fasa antara arus dan tegangan. Jika arus tertinggal terhadap tegangan sebesar ϕ maka disebut lagging, dan jika arus mendahului tegangan sebesar ϕ maka disebut leading. Nilai faktor daya ini bervariasi yaitu antara 0 sampai dengan 1 atau biasanya dinyatakan dalam persen.

Faktor daya juga bisa disebut $\cos \phi$ mungkin leading ataupun lagging. Pengertian yang dapat membantu untuk memudahkan dalam memahami perbedaan antara lagging dan leading adalah jika arah daya aktif dan reaktif adalah sama maka faktor daya pada titik referensi tersebut adalah lagging dan jika arah daya aktif berlawanan dengan arah daya reaktif maka disebut leading.

Dari gambar 3.10(b) maka persamaan matematika sederhana dari segitiga siku - siku (segitiga daya) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\cos \phi = PF = \frac{\text{daya}_{\text{aktif}}}{\text{daya}_{\text{total}}} = \frac{KW}{KVA} \quad 3.29$$

$$\tan \phi = \frac{\text{daya}_{\text{reaktif}}}{\text{daya}_{\text{aktif}}} = \frac{KVAR}{KW} \quad 3.30$$

Biasanya untuk memperbaiki faktor daya digunakan beberapa peralatan seperti :

1. Generator sinkron

Untuk membangkitkan daya reaktif adalah dengan mengatur arus penguatannya. Pengiriman daya reaktif gejala-gejala adalah dengan mengatur pada keadaan penguatan lebih. Generator sebagai sumber daya aktif 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

2. Kondensator 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 dari jala – jala dan jika penguatannya "over excited" maka mesin tersebut akan mengirmkan daya reaktif ke jala – jala. Kondensator 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. Kondensator sinkron digunakan untuk memenuhi daya reaktif yang relatif besar (antara 5 – 10 MVAR) pada jala – jala yang cukup luas.

3. Kapasitor Shunt

Merupakan komponen pembangkit daya reaktif yang praktis, rnan dan sederhana untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif yang realif kecil. Kapasitor shunt terdiri dari unit – unit standard mulai dari 15 KVAR sampai 20 MVAR.

4. Kapasitor Seri

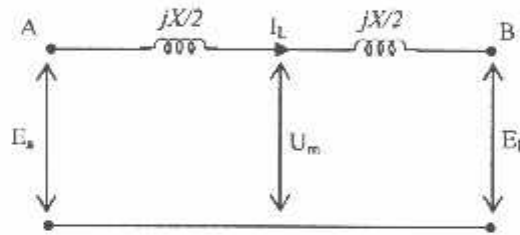
Merupakan kapasitor yang terpasang seri pada jaringan, dapat dipakai untuk memperbaiki power faktor akan tetapi relatif kecil. Biasanya kapasitor seri ini di gunakan untuk mengkompensasi reaktansi induktif pada saluran sehingga dapat meningkatkan transfer daya.

3.4. Diagram Fasor dan Persamaan Daya Transmisi

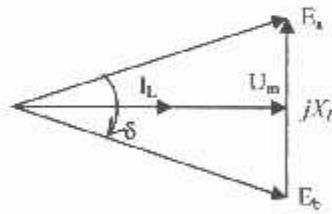
Dari gambar 3.11 dapat dilihat saluran transmisi yang menghubungkan dua bus A dan bus B. Sumber yang terkoneksi dengan tiap bus dapat berupa mesin tunggal atau jaringan yang lebih besar. Reaktansi efektif saluran dinyatakan dengan X_1 termasuk reaktansi saluran X_L dan reaktansi kapasitor seri X_C . Untuk menyederhanakan analisa maka efek shunt susceptance diabaikan.

Jika reaktansi saluran X_L dan reaktansi kompensasi seri adalah X_C maka,

$$X_1 = X_L - X_C \quad 3.31$$



Gambar 3.11
Rangkaian pengganti saluran transmisi



Gambar 3.12
Diagram fasor saluran transmisi

Asumsi :

- Reaktansi saluran lebih besar daripada impedansi sumber, sehingga tegangan bus dapat diasumsikan sebagai sumber tegangan konstan.
- Amplitudo masing – masing bus adalah sama ($E_a = E_b = E$), dengan perbedaan fasa tegangan.

Pada keadaan ini arus saluran :

$$I_L = \frac{2jE \sin(\delta/2)}{jX_L} = \frac{2E \sin(\delta/2)}{X_L} \quad 3.32$$

Arus sefase dengan tegangan pada titik tengah transmisi. Daya yang mengalir pada saluran adalah hasil kali arus dan tegangan pada titik tengah saluran .

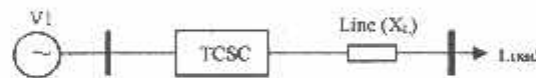
$$P = I_L U_m = \frac{E^2 \sin \delta}{X_L - X_C} \quad 3.33$$

BAB IV

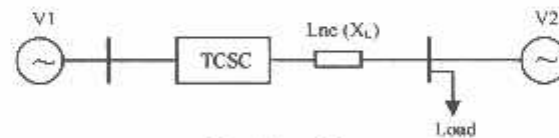
ANALISA DAN SIMULASI

Pengujian hasil rancangan simulasi ini dilakukan dengan membandingkan hasil yang diperoleh antara pengatur impedansi dengan kontrol PI. Dari kontroler PI dan pengatur impedansi tersebut akan disimulasikan ke dalam dua macam rangkaian, yaitu rangkaian dengan satu sumber yang terhubung seri dengan beban melalui saluran transmisi, dan rangkaian dengan dua sumber yang terhubung dengan beban melalui saluran transmisi.

Karena sistem dianggap seimbang maka hanya dilakukan analisis satu fasa, besarnya line charging pada saluran diabaikan dan resistansi pada saluran juga diabaikan. Pada gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat blok diagram sistem jaringan transmisi dengan menggunakan satu sumber dan dua sumber .



Gambar 4.1
Jaringan transmisi dengan satu sumber

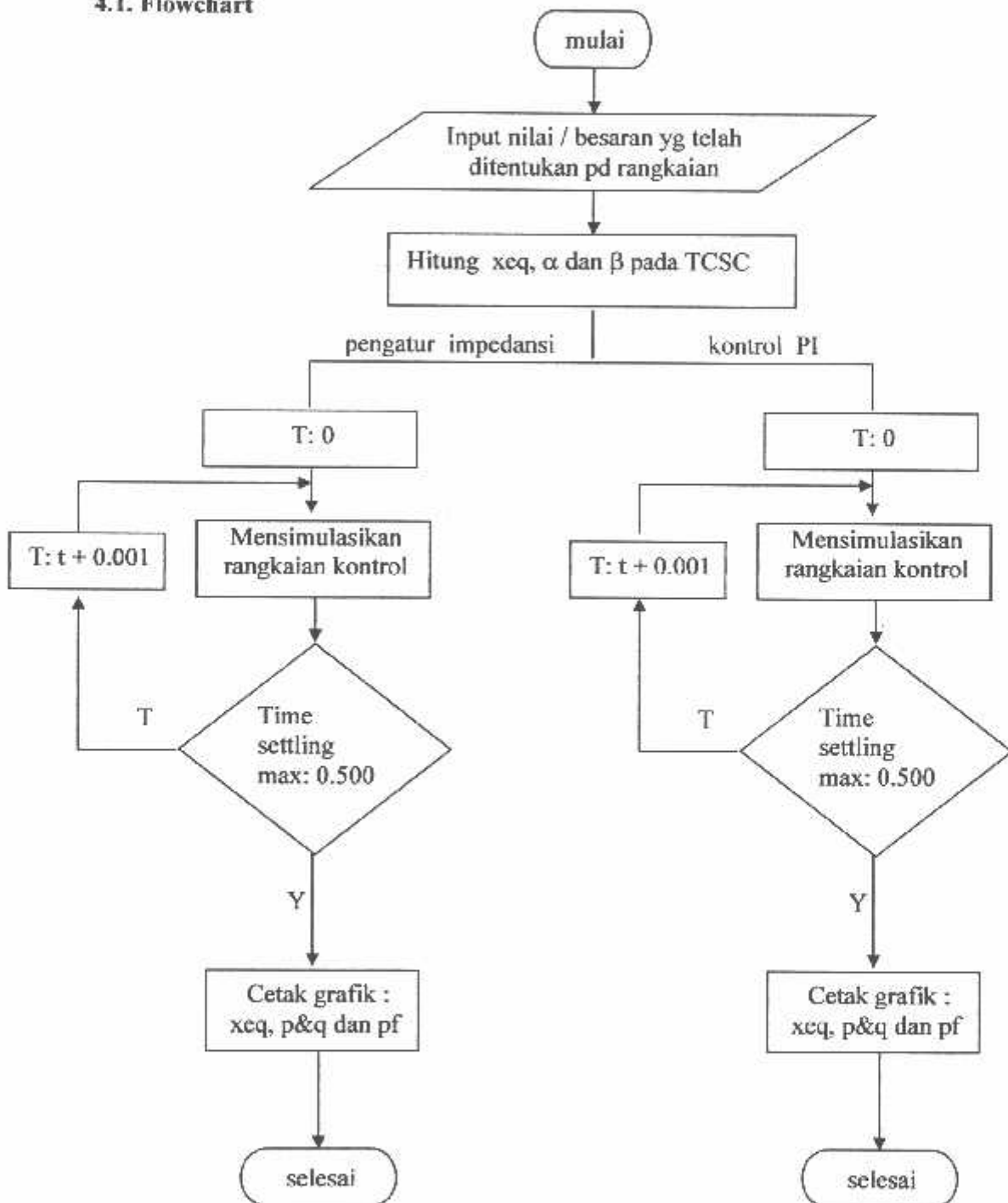


Gambar 4.2
Jaringan transmisi dengan dua sumber

Untuk menguji dan menganalisis unjuk kerja TCSC dilakukan simulasi dengan menggunakan software Simulink Matlab 6.5. Semua nilai atau besaran

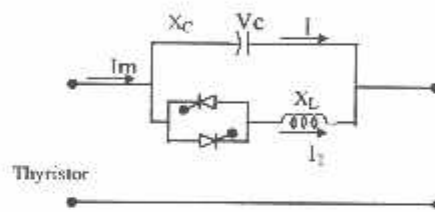
yang ada pada rangkaian adalah dipilih, kecuali dalam penentuan parameter TCSC dilakukan penghitungan.

4.1. Flowchart



4.2. Penentuan Parameter TCSC

Pada gambar 4.3 dapat dilihat rangkaian dasar dari TCSC yang terdiri atas kapasitor seri yang terhubung paralel dengan induktor. Induktor ini memiliki harga reaktansi (X_L) yang dapat diubah-ubah, sehingga dapat menentukan reaktansi total dari TCSC itu sendiri. Perubahan nilai reaktansi dari pada TCSC dapat ditentukan dengan mengubah sudut penyalan (α) thyristor yang terhubung dengan induktor.



Gambar 4.3
Rangkaian TCSC

Dalam menentukan parameter – parameter TCSC perlu diperhatikan adanya kondisi resonansi yang terjadi pada range sudut konduksi $0^\circ < \beta < 90^\circ$. Dengan menentukan harga k yang tepat maka resonansi yang terjadi pada TCSC dapat dibatasi. Dalam hal ini k adalah [8]:

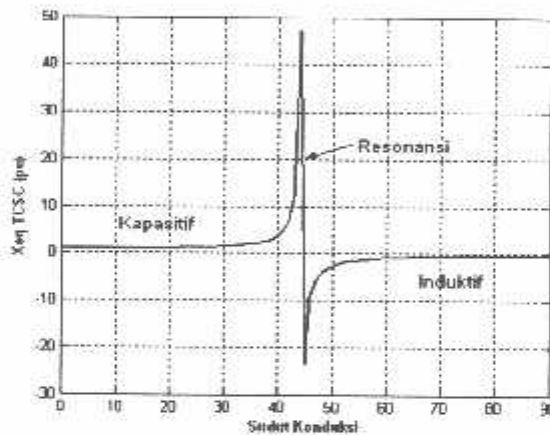
$$k = \frac{\omega_r}{\omega} = \sqrt{\frac{1}{\omega L} \cdot \frac{1}{\omega C}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \quad 4.1$$

Pada persamaan 4.2 sesuai dengan persamaan (3.20), maka akan didapatkan hubungan reaktansi ekivalen fundamental TCSC sebagai fungsi sudut konduksi (β).

Dengan memasukkan harga k ke dalam persamaan 4.2 [6] dapat diketahui banyaknya resonansi yang terjadi pada range sudut konduksi $0^\circ < \beta < 90^\circ$.

$$X_{eq(\omega)} = 1 - \frac{k^2 (2\beta + \sin 2\beta)}{\pi(k^2 - 1)} + \frac{4k^2 \cos^2 \beta}{\pi(k^2 - 1)^2} (k \tan k\beta - \tan \beta) \quad 4.2$$

Untuk harga $k = 2$ maka didapatkan plot reaktansi ekivalen TCSC sebagai fungsi sudut konduksi β seperti pada gambar 4.4.



Gambar 4.4

Plot reaktansi ekivalen TCSC sebagai fungsi sudut konduksi β

Dari gambar diatas maka dapat diketahui bahwa resonansi hanya terjadi satu kali untuk $k=2$, yaitu pada sudut konduksi $\beta \approx 45^\circ$. Pada saat resonansi tersebut X_{eq} berharga sangat tinggi. Pada saat $\beta < 45^\circ$, X_{eq} bersifat kapasitif,

sedangkan setelah melewati batas resonansi pada saat $\beta > 45^\circ$, X_{eq} bersifat induktif.

Pada kondisi blocked mode TCSC sepenuhnya sebagai kapasitor seri dimana keseluruhan arus melalui kapasitor. Kondisi ini digunakan untuk menentukan besar kompensasi TCSC terhadap reaktansi saluran

Dalam hal ini dipilih harga $X_C = 15 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$

Sehingga didapat harga C dalam μF ,

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 15} = 212 \cdot 10^{-6} = 212 \mu\text{F}$$

Untuk menentukan harga X_L maka perlu ditentukan jumlah titik resonansi terhadap sudut konduksi thyristor. Untuk titik resonansi = 1 maka $k = 2$, sehingga dengan menggunakan persamaan 4.1 didapatkan harga X_L , yaitu :

$$k = \frac{\omega L}{\omega} = \sqrt{\frac{1}{\omega L} \frac{1}{\omega C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

$$k = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

$$2 = \sqrt{\frac{15}{X_L}}$$

$$4 = \frac{15}{X_L}$$

$$X_L = \frac{15}{4} = 3.75 \Omega$$

Maka induktansi L dalam mH adalah,

$$X_L = 2\pi f L$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} = \frac{3.75}{2\pi \times 50} = 0.0119 = 11.9 \text{ mH}$$

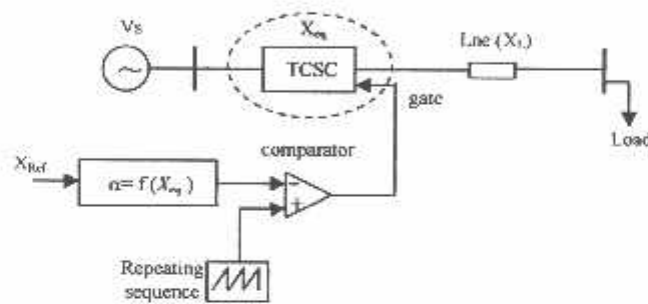
Tabel 4.1
Hubungan reaktansi ekuivalen dengan sudut konduksi β
dan sudut penyalaan α

$X_{eq} \text{ (pu)}$	$X_{eq} \text{ (} \Omega \text{)}$	α°	β°
1	15	0	0
1.0763	16.14	160	20
1.3749	20.62	150	30
1.6970	25.45	146	34
2.1693	32.53	143	37
2.4181	36.27	142	38

4.3. Pemodelan TCSC Menggunakan Matlab

Di dalam simulasi ini akan dilakukan dua macam pemodelan yaitu model pengatur impedansi dan model kontrol PI. Dua macam model tersebut tersebut ditunjukkan seperti pada gambar 4.5 dan gambar 4.6.

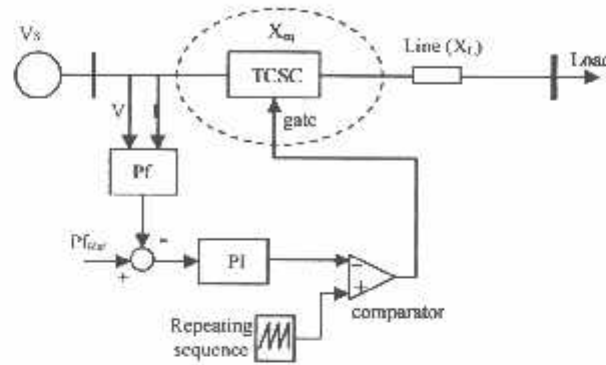
1. Pengatur Impedansi



Gambar 4.5
Sistem rangkaian pengatur impedansi

Pada gambar 4.5 diatas dapat dilihat bahwa reaktansi ekivalen TCSC (X_{eq}) dapat diatur dengan cara mengubah sudut penyalaan α secara langsung tanpa menggunakan feedback. Dimana X_{ref} adalah sebagai masukan dari pengatur yang kemudian akan menghasilkan suatu sinyal. Kemudian sinyal ini dilewatkan melalui komparator bersama dengan sinyal yang dihasilkan oleh repeating sequence. Sehingga dihasilkan pulsa yang dapat dipakai sebagai trigger pada gate thyristor.

2. Kontrol PI



Gambar 4.6
Sistem rangkaian kontrol PI

Untuk PI controller yang diatur adalah power faktor dari suatu jaringan transmisi. Dengan memasukan power faktor referensi maka akan dapat dipakai untuk mengatur sudut penyalan thyristor, sehingga dapat diketahui besarnya reaktansi ekivalen TCSC (X_{Ref}) sesuai dengan perubahan sudut penyalan tersebut. Harga K_p dan K_i dalam PI controller ini ditentukan dengan cara try and error.

4.4. Hasil Simulasi

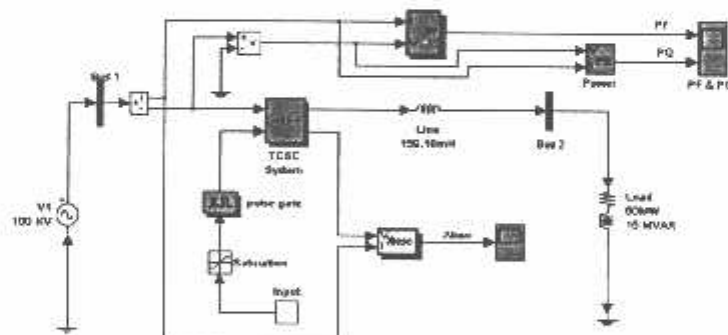
Pada simulasi ini, TCSC difungsikan sebagai kapasitif device sehingga fungsi dari TCSC ini hanya sebagai kompensasi reaktansi induktif pada saluran transmisi dengan kata lain TCSC dioperasikan pada mode kapasitif vernier.

Power faktor dari jaringan transmisi dipakai sebagai acuan pada pengaturan reaktansi TCSC itu sendiri. Pemodelan suatu sistem jaringan dengan adanya TCSC yang menggunakan pengatur impedansi dan kontrol PI di simulasikan dalam dua bentuk model rangkaian yaitu, rangkaian dengan satu sumber dan rangkaian dengan dua sumber.

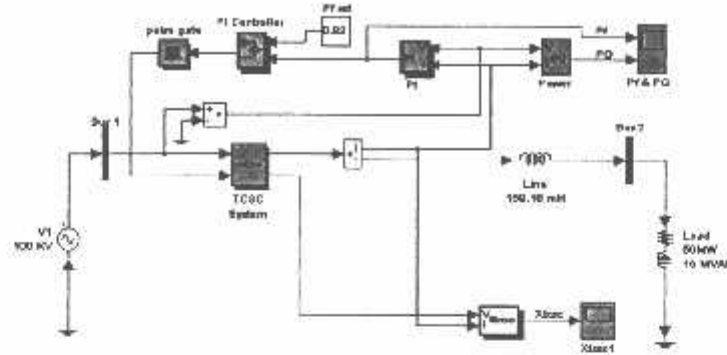
4.4.1. Model Jaringan Satu Sumber

Pada sistem jaringan ini menggunakan satu sumber yang terhubung dengan beban melalui sebuah saluran transmisi. Besarnya reaktansi saluran adalah dipilih sebesar 50Ω , yang memiliki nilai induktansi sebesar 159.18mH . Sumber tegangan yang digunakan adalah sebesar $100 \text{ kV} \angle 0^\circ$.

Rangkaian sistem satu sumber dengan pengatur impedansi dan PI kontrol dapat dilihat pada gambar 4.7 dan gambar 4.8.



Gambar 4.7
Rangkaian sistem satu sumber dengan pengatur impedansi



Gambar 4.8
Rangkaian sistem satu sumber dengan PI Kontrol

Dengan kedua model simulink Matlab diatas maka dilakukan uji coba dengan memasukkan parameter-parameter yang telah ditentukan. Simulasi dilakukan dalam tiga tahap yaitu,

- Jaringan tanpa TCSC
- Jaringan dengan TCSC → $X_{eq}=15\Omega$
- Jaringan dengan TCSC → $X_{eq}=25\Omega$

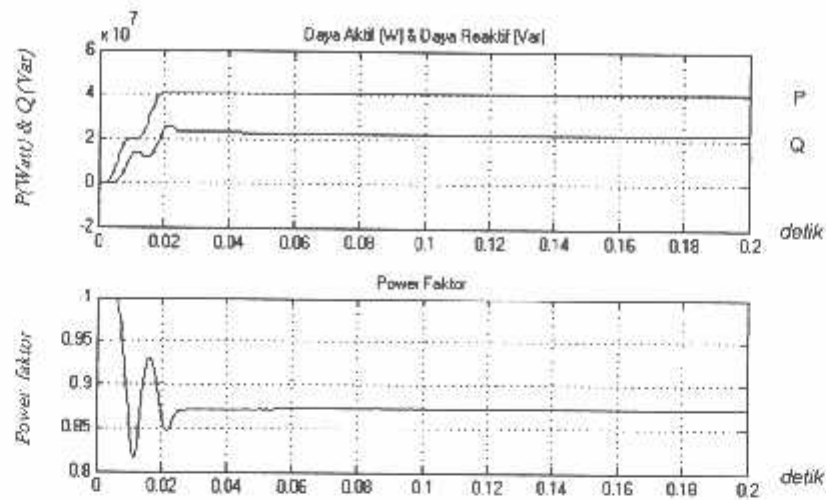
Hasil yang diamati adalah sinyal power faktor, daya (P), Daya (Q) dan reaktansi ekivalen TCSC. Serta respon kecepatan antara kontrol PI dengan pengatur impedansi untuk mencapai kondisi steady state.

➤ Output simulasi rangkaian sistem tanpa TCSC dapat dilihat pada gambar 4.9:

$$P = 41 \text{ MWatt}$$

$$Q = 23 \text{ MVAR}$$

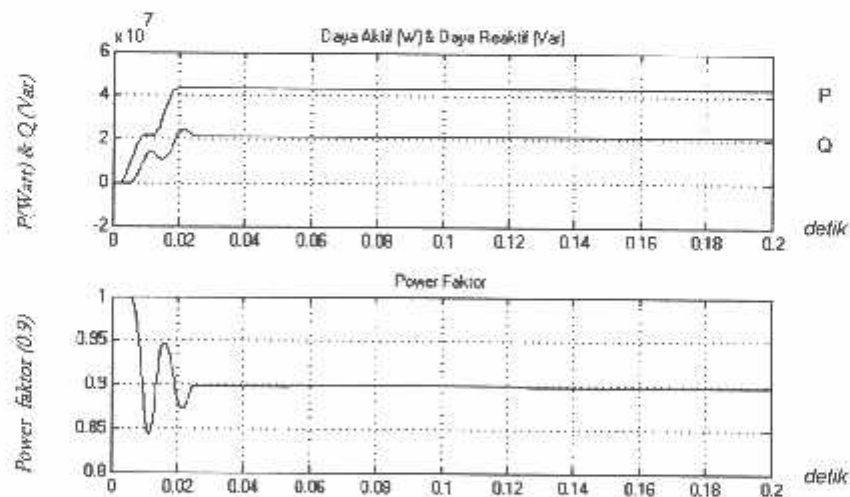
$$\text{Cos } \phi = 0.87 \text{ lagging}$$

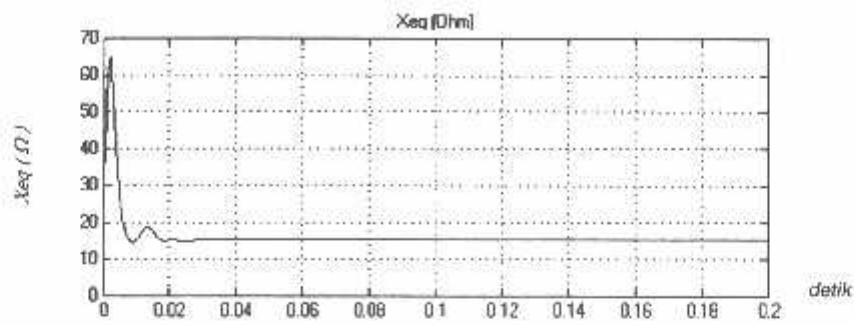


Gambar 4.9

Output simulasi daya (P, Q) dan power faktor tanpa TCSC

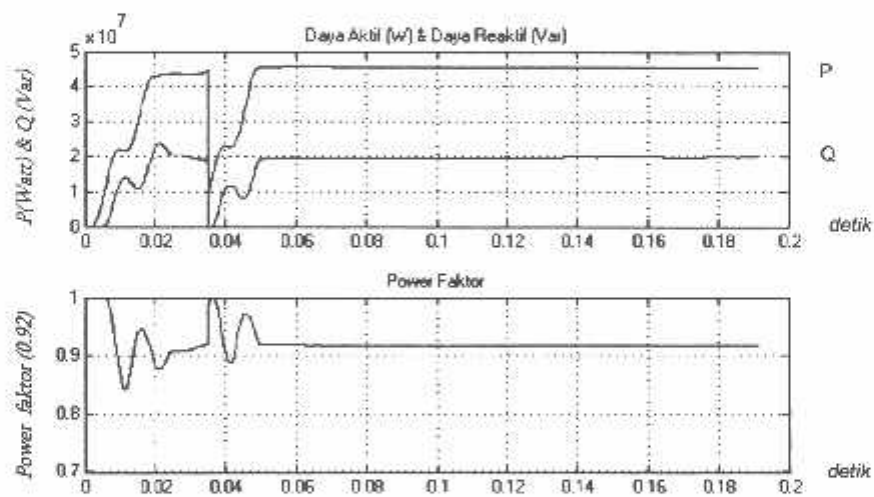
- Output simulasi dengan TCSC, dimana TCSC sepenuhnya sebagai kapasitor seri dapat dilihat pada gambar 4.10. Dalam hal ini nilai reaktansi TCSC adalah sebesar 15Ω .

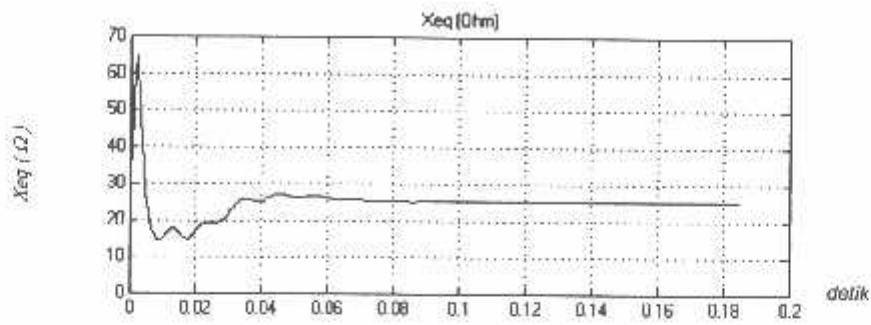




Gambar 4.10
Output Simulasi dengan $X_{eq} = 15 \Omega$

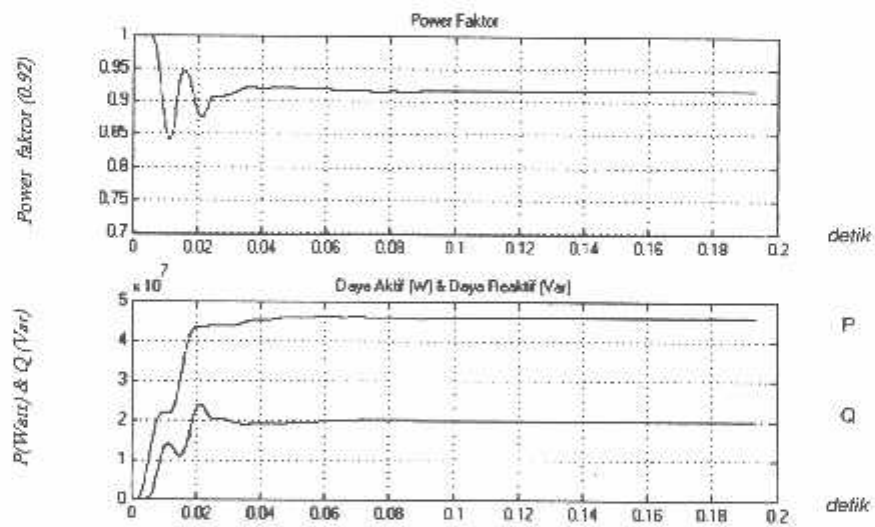
- Output simulasi dari sistem jaringan yang menggunakan pengatur impedansi dengan $X_{eq} = 25 \Omega$ dapat dilihat pada gambar dibawah ini :

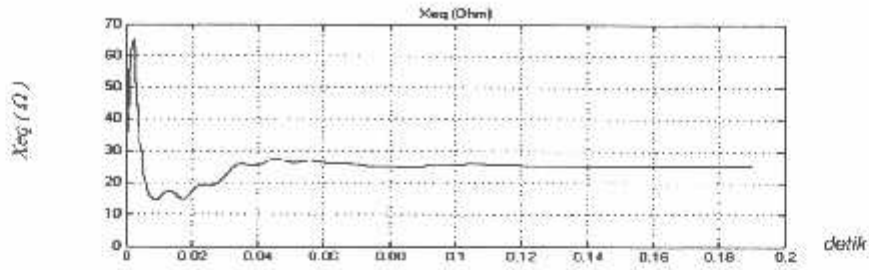




Gambar 4.11
Output Simulasi pengatur impedansi dengan $X_{eq} = 25\Omega$

- Hasil simulasi dari sistem jaringan yang menggunakan PI controller dapat dilihat pada gambar dibawah ini :





Gambar 4.12
Output Simulasi kontrol PI dengan $X_{eq} = 25\Omega$

Dari hasil pengamatan simulasi yang telah dilakukan, maka diperoleh hasil seperti pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.2
Hasil simulasi rangkaian sistem 1 sumber

Output simulasi	Tanpa TCSC	TCSC		TCSC	
		Pengatur Impedansi	Kontrol PI	Pengatur Impedansi	Kontrol PI
$X_{eq} (\Omega)$	0	15.01	15.01	24.34	25.39
P(MWatt)	41	44	44	45.7	46
Q (MVar)	23	21.3	21.3	19.8	19.9
PF (lagging)	0.87	0.89	0.89	0.9175	0.918

Tabel 4.3
Perbandingan Output PI Kontrol dengan Impedansi Kontroller rangkaian 1 sumber ($Pf_{Ref} = 0.92$)

Output	Kontrol PI	Pengatur Impedansi
Max. Overshoot	8%	8%
Settling time	0.1 detik	0.05 detik
% Error	0.2%	0.25 %

4.4.2. Model Jaringan Dua Sumber

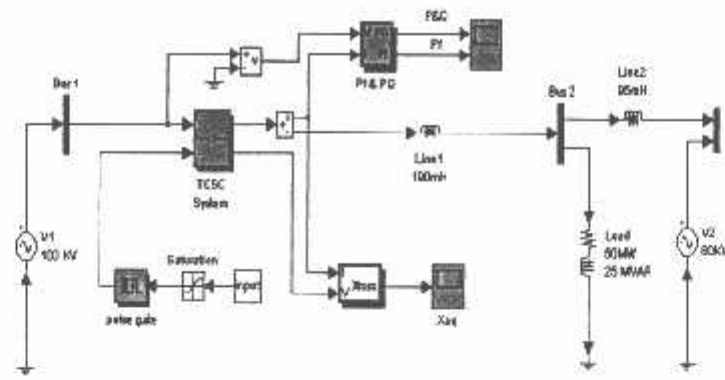
Pada sistem jaringan ini menggunakan dua sumber yang terhubung dengan beban melalui sebuah saluran transmisi. Besarnya reaktansi saluran L1 adalah sebesar 60Ω , yang memiliki nilai induktansi sebesar 190mH dan saluran L2 adalah sebesar 30Ω , yang memiliki nilai induktansi sebesar 95 mH. Sumber tegangan V1 adalah sebesar $100 \text{ kV} \angle 0^\circ$ dan untuk V2 adalah sebesar $80 \text{ kV} \angle 30^\circ$.

Rangkaian sistem satu sumber dengan pengatur impedansi dan PI kontrol dapat dilihat pada gambar 4.13 dan gambar 4.14. Dengan kedua model simulink Matlab pada gambar 4.13 dan gambar 4.14 maka dilakukan uji coba dengan memasukkan parameter-parameter yang telah ditentukan.

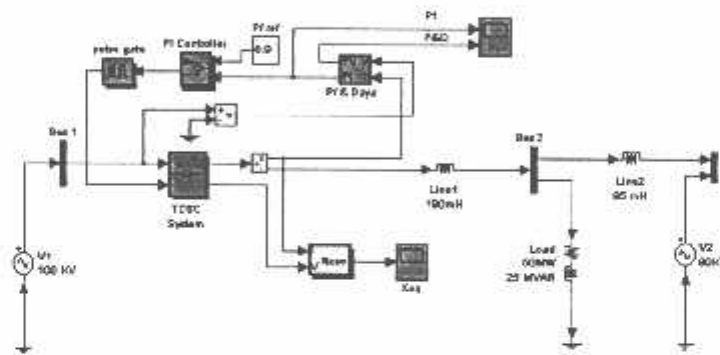
Simulasi dilakukan dalam tiga tahap yaitu,

- Jaringan tanpa TCSC
- Jaringan dengan TCSC $\rightarrow X_{eq}=30\Omega$
- Jaringan dengan TCSC $\rightarrow X_{eq}=35\Omega$

Hasil yang diamati adalah sinyal power faktor, daya (P), Daya (Q) dan reaktansi ekivalen TCSC. Serta respon kecepatan antara kontrol PI dengan pengatur impedansi untuk mencapai kondisi steady state.

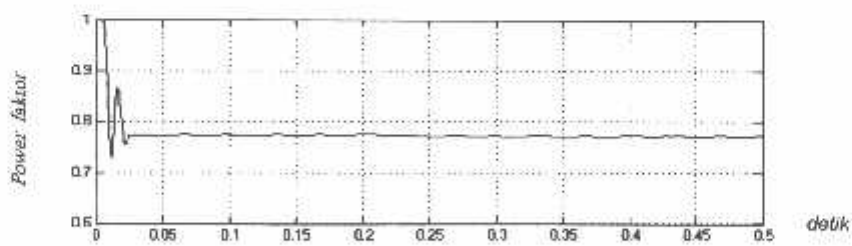


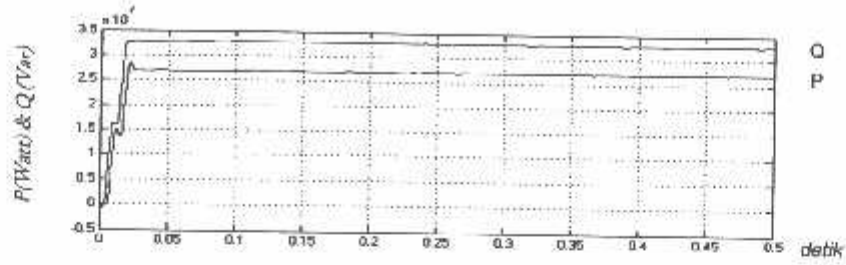
Gambar 4.13
Rangkaian sistem dua sumber dengan pengatur impedansi



Gambar 4.14
Rangkaian sistem dua sumber dengan PI kontroll

- Output simulasi rangkaian sistem tanpa TCSC dapat dilihat pada gambar 4.15:

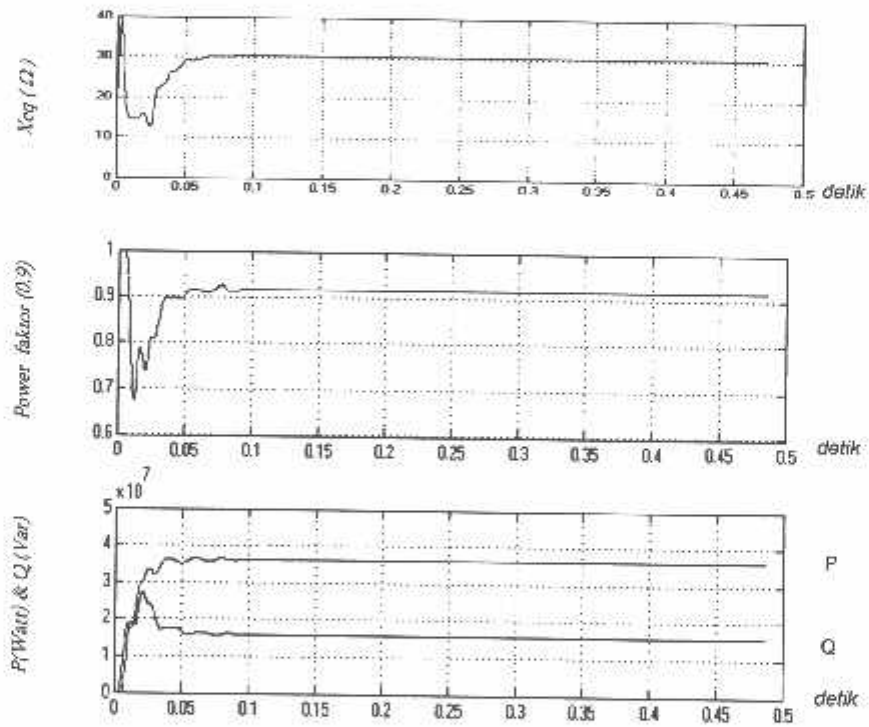




Gambar 4.15

Output simulasi daya (P, Q) dan power faktor tanpa TCSC

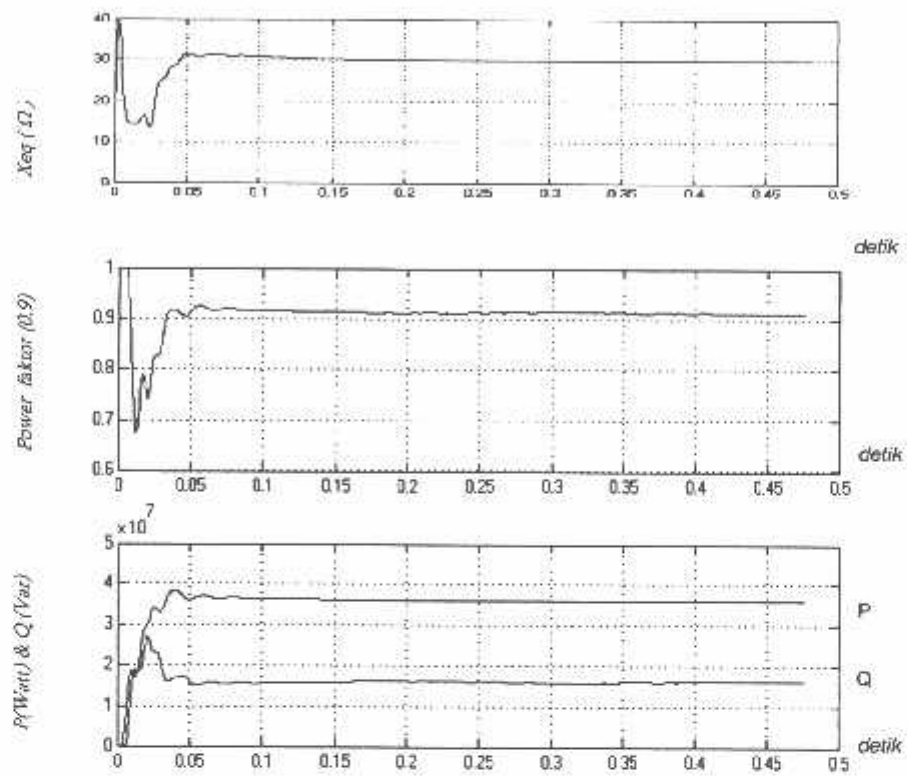
- Output simulasi dari sistem jaringan yang menggunakan pengatur impedansi dengan $X_{eq} = 30 \Omega$



Gambar 4.16

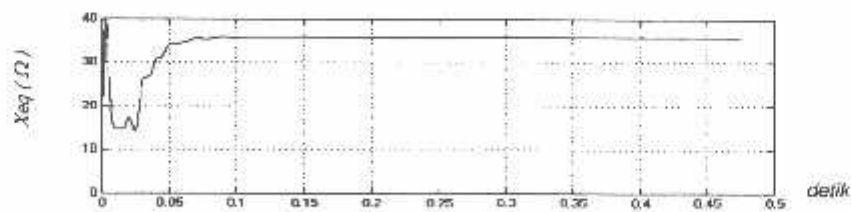
Output Simulasi Pengatur Impedansi dengan $X_{eq} = 30\Omega$

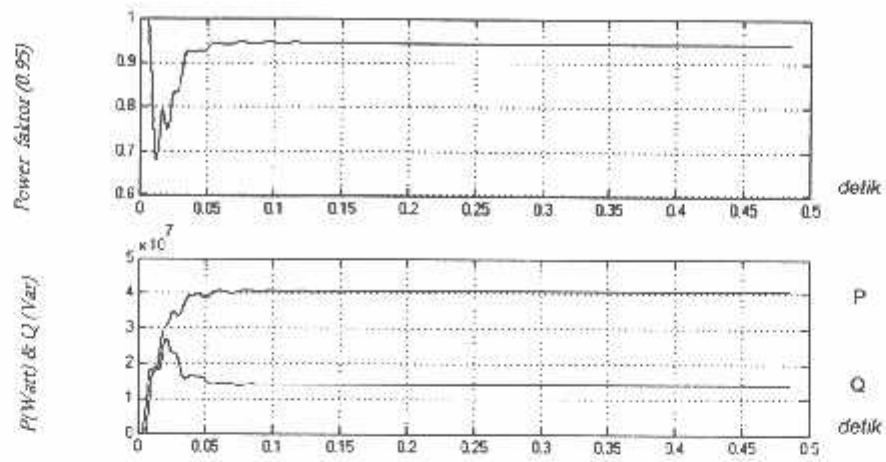
- Output simulasi dari sistem jaringan yang menggunakan kontrol PI dengan $X_{eq} = 30 \Omega$



Gambar 4.17
Output Simulasi kontrol PI dengan $X_{eq} = 30\Omega$

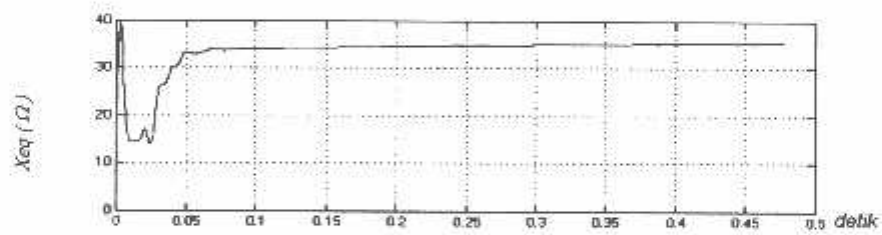
- Output simulasi dari sistem jaringan yang menggunakan pengatur impedansi dengan $X_{cq} = 35 \Omega$

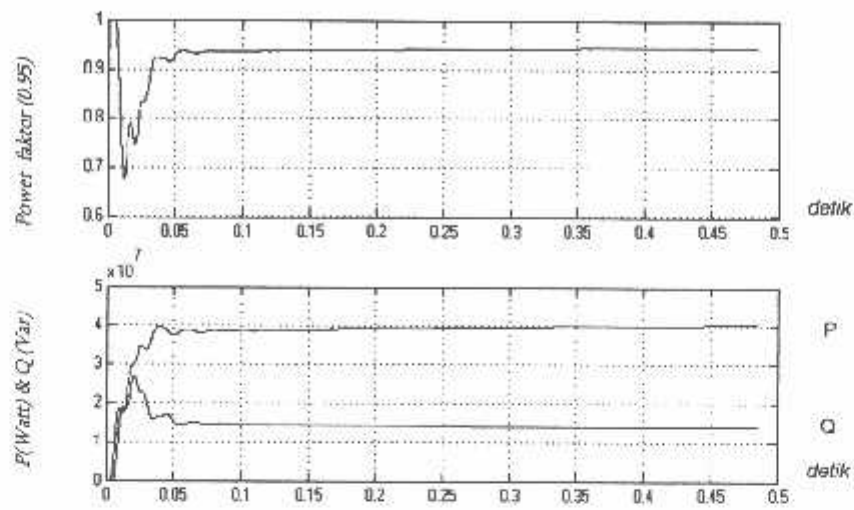




Gambar 4.18
Output Simulasi Pengatur Impedansi dengan $X_{eq} = 35\Omega$

- Output simulasi dari sistem jaringan yang menggunakan kontrol PI dengan $X_{eq} = 35\Omega$





Gambar 4.19
Output Simulasi kontrol PI dengan $X_{eq} = 35\Omega$

Dari hasil pengamatan simulasi yang telah dilakukan, maka diperoleh hasil seperti pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.4
Hasil simulasi rangkaian sistem 2 sumber

Output simulasi	Tanpa TCSC	TCSC		TCSC	
		Pengatur Impedansi	Kontrol PI	Pengatur Impedansi	Kontrol PI
$X_{eq}(\Omega)$	0	30.46	30.01	35.79	36.2
P(MWatt)	34	36.3	36	39	40.2
Q (MVar)	27	16	16	14	13.8
PF (lagging)	0.78	0.9151	0.9134	0.9461	0.9481

Tabel 4.5
Perbandingan Output PI Kontrol dengan Pengatur Impedansi
rangkaian 2 sumber ($Pf_{Ref}=0.9$)

Output	Kontrol PI	Pengatur Impedansi
Max. Overshoot	24%	23%
Settling time	0.25 detik	0.125 detik
% Error	1.34 %	1.51 %

Tabel 4.6
Perbandingan Output PI Kontrol dengan Pengatur Impedansi
rangkaian 2 sumber ($Pf_{Ref}=0.95$)

Output	Kontrol PI	Pengatur Impedansi
Max. Overshoot	24%	23%
Settling time	0.35 detik	0.125 detik
% Error	0.19%	0.39%

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari serangkaian pemodelan sistem TCSC dan mensimulasikannya pada simulink matlab yang telah dilakukan didapatkan hasil seperti yang telah dibahas pada pokok bahasan analisa dan simulasi pada bab IV. Dengan dasar data-data yang ada dan analisa itulah, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) dapat dipakai untuk meningkatkan transfer daya pada saluran transmisi dengan cara mengkompensasi reaktansi induktif pada saluran.
2. Maksimum overshoot antara pengatur impedansi dengan kontrol PI tidak berbeda, yaitu sebesar 8% dengan referensi power faktor 0.92.
3. Respon kecepatan pengatur impedansi untuk mencapai steady state lebih cepat yaitu 0.05 detik, sedangkan untuk kontrol PI adalah 0.1 detik.
4. Prosentase kesalahan pengatur Impedansi dengan referensi power faktor 0.92 adalah sebesar 0.25% sedangkan untuk kontrol PI adalah sebesar 0.2%
5. Pada rangkaian dua sumber dengan referensi power faktor 0.9 memiliki maksimum overshoot kontrol PI = 24% dan pengatur impedansi 23%, settling time kontrol PI = 0.25detik, dan pengatur impedansi=0.125detik, prosentase error kontrol PI=1.34% dan pengatur impedansi = 1.51%.

6. Pada rangkaian dua sumber dengan referensi power faktor 0.95 memiliki maksimum overshoot kontrol PI = 24% dan pengatur impedansi 23%, settling time kontrol PI = 0.35detik, dan pengatur impedansi=0.125 detik, prosentase error kontrol PI=0.19% dan pengatur impedansi = 0.39%.

5.2. Saran

1. Karena pada TCSC terdapat komponen thyristor maka untuk penerapannya perlu diperhatikan besarnya harmonisa yang ditimbulkan pada saat thyristor berkonduksi, sehingga tidak menyebabkan penurunan kualitas sistem tenaga listrik.
 2. Pengatur impedansi dapat dijadikan solusi dalam pengaturan TCSC karena memiliki respon yang lebih cepat dari pada kontrol PI. Karena itu pengatur impedansi mungkin dapat dikembangkan lebih sempurna lagi sehingga kecepatan serta tingkat akurasi dari kontrol tersebut bisa menjadi lebih baik.
-

DAFTAR PUSTAKA

1. Li B.H, Wu, Q.H, Wang, P.Y, Zhou, X.X, " *Influence of The Transient Process of TCSC and MOV on Power System Stability* ", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 15, No. 2, May 2000.
2. Mochamad Ashari, " *Analisis Reaktansi dan Distorsi Harmonisa Thyristor Controlled Series Capacitor* ", Seminar Sistem Tenaga Elektrik III, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, October 8th 2002
3. R. Mohan Mathur, Rajiv K Varma, " *Thyristor-Based FACTS Controllers For Electrical Transmission Systems* ", (John Wiley & Sons, 2002)
4. Rolf Grunbaum, " *Enhancing of Transmssion Capability of Power Coridors by Means of series Compensation* ", CEPEX' 99 Conference, Poznan, March 1999.
5. Stevenson, William D. Jr, " *Analisa Sistem Tenaga Listrik* ", Edisi Keempat, Alih Bahasa Ir. Kamal Idris, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1984.
6. Turan Gonen, " *Electric Power Distribution System Engineering* ", (Mc Graw – Hill Book Company).

" List program perhitungan X_{eq} TCSC " (Matlab 6.5)

```
clear
clc
f=50;
L=11.9e-3;
C=212e-6;
wi=2*pi*f;
Xl=2*pi*f*L;
Xc=1/(2*3.14*f*C);
k=sqrt(Xc/Xl);
s=1;
% Sudut konduksi beta
b=0:1:90;
for a=1:91;
    t(a)=(k^2)*((2*b(a)*pi/180)+sin(2*b(a)*pi/180));
    v(a)=((4*(k^2)*(cos(b(a)*pi/180))^2));
    w(a)=(k*tan(k*b(a)*pi/180)-(tan(b(a)*pi/180)));
    u1=pi*(k^2-1);
    u2=pi*((k^2-1)*(k^2-1));

    % Reaktansi Ekuivalen TCSC (per-unit)
    Xeq(a)=s-(t(a)/u1)+((v(a)*w(a))/u2);
end
r'
j=plot(b,Xeq,'color','b','LineWidth',2);
xlabel('Sudut Konduksi','fontweight','Bold');
ylabel('Reaktansi ekuivalen TCSC','fontweight','Bold');
title('Gbr. reaktansi sebagai fungsi Beta','fontweight','Bold');
grid on;
save('xeq');
saveas(j,'xeq.fig');
load chirp;
y1 = y; Fs1 = Fs;
load gong;
wavplay(y1,Fs1,'sync') % The chirp signal finishes before the
wavplay(y,Fs) % gong signal begins playing.
```



**BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

1. Nama : Widy Mujiyanto
2. NIM : 97.12.037
3. Jurusan : Teknik Elektro S-1
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : **Simulasi Pengatur Impedansi Dan Kontrol PI Pada TCSC Dengan Menggunakan Perangkat Lunak Matlab.**

Dipertahankan Dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1) pada :

Hari : **Senin**
Tanggal : **25 September 2006**
Dengan Nilai : **72,80 (B+) *hm***



Ir. Mochtar Asroni, MSME
NIP.Y.1018100036

Panitia Ujian Skripsi

Sekretaris

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
NIP.Y.1039500274

Anggota Penguji

Penguji I

Ir. I Made Wartana, MT
NIP.131 991 182

Penguji II

Ir. M. Abdul Hamid, MT
NIP.Y.101 880 0188



PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro jenjang strata satu (S-1) yang diselenggarakan pada :

Hari : Senin
Tanggal : 25 September 2006

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. **Nama** : Widy Mujiyanto
2. **NIM** : 97.12.037
3. **Jurusan** : Teknik Elektro S-1
4. **Konsentrasi** : Teknik Energi Listrik
5. **Judul Skripsi** : SIMULASI PENGATUR IMPEDANSI DAN KONTROL PI PADA TCSC DENGAN MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK MATLAB

Perbaikan meliputi :

No.	Materi Perbaikan	Ket.
1.	Tujuan pengontrolan TCSC dalam konteks FACTS devices perlu di pertegas	
2.	Sistem yang optimal	
3.	Yang dikontrol apa	
4.	Dan lain - lain	

Disetujui / diperiksa

Penguji I

(Ir. I Made Wartana, MT)
NIP.131 991 182

Penguji II

(Ir. M. Abdul Hamid, MT)
NIP.Y.101 880 0188

Mengetahui / menyetujui
Dosen Pembimbing

(Ir. Widodo Pudji. M, MT)
NIP.Y.102 870 0171



Nama : Widy Mujiyanto
Nim : 97.120.37
Masa Bimbingan : 1 Juli 2006/1 Januari 2007
Judul Skripsi : Simulasi Kontrol PI Dan Pengatur Impedansi Pada TCSC
Menggunakan Perangkat Lunak MATLAB

No	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1	3/8 2006	KONSULTASI BAB I	
2	5/8 2006	KONSULTASI BAB II	
3	6/8 2006	KONSULTASI BAB III	
4	7/8 2006	KONSULTASI BAB IV	
5	8/8 2006	KONSULTASI BAB V	
6	9/8 2006	REVISI BAB V	
7	10/9 2006	ACC MAKLAH SEMINAR HASIL	
8			
9			
10			

Malang, 2007
Dosen Pembimbing

(Ir. Widodo Padjji, M, MT)

Form S-4a



LEMBAR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : Widy Mujiyanto
NIM : 97.12.037
Jurusan : Teknik Elektro S-1
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
Judul Skripsi : Simulasi Pengatur Impedansi Dan Kontrol PI Pada
TCSC Dengan Menggunakan Perangkat Lunak
Matlab.
Mulai Bimbingan Skripsi : 1 Juli 2006
Selesai Bimbingan Skripsi : 1 Januari 2007
Pembimbing : Ir. Widodo Pudji. M, MT
Dengan Nilai : 80 (A) *Rm*

Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Elektro S-1

(Ir. F. Yudi Limpraptono, MT)
NIP.Y. 103 950 0274

Disetujui
Dosen Pembimbing I

(Ir. Widodo Pudji. M, MT)
NIP.Y. 102 870 0171
