

ANALISIS PENEMPATAN *THYRISTOR CONTROLLED SERIES
COMPENSATOR (TCSC)* PADA SALURAN BUKIT KEMUNING –
BATURAJA DI SISTEM TENAGA LISTRIK LAMPUNG

(Skripsi)

Oleh
Ari Alfian



FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016

ABSTRAK

ANALISIS PENEMPATAN *THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATOR* (TCSC) PADA SALURAN BUKIT KEMUNING – BATURAJA DI SISTEM TENAGA LISTRIK LAMPUNG

Oleh

Ari Alfian

Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) adalah kompensator seri berbasis FACTS yang bertujuan untuk mengatur aliran daya aktif pada suatu saluran transmisi. Dengan mengatur aliran daya pada suatu saluran transmisi dapat mengatur kebutuhan daya aktif pada beban yang terhubung pada bus penerima atau bus pengirim atau bus-bus lain yang berdekatan atau dengan kata lain mengatur kemampuan suatu saluran transmisi dalam mengirim daya aktif.

Tujuan dari penelitian tugas akhir ini adalah menganalisa penempatan TCSC pada saluran transmisi antara bus Baturaja dan Bukit Kemuning di sistem tenaga listrik wilayah Lampung. Analisis dilakukan dengan mengubah-ubah besar nilai reaktansi X_{tcsc} dengan mengubah-ubah nilai induktansi yang paralel dengan suatu kapasitor dengan besar nilai yang tetap. Perhitungan aliran daya dilakukan dengan menggunakan software Matpower 5.1 yang berbasis bahasa pemrograman MATLAB.

Hasil penelitian ini menggunakan analisa aliran daya pada saluran Bukit Kemuning – Baturaja di sistem tenaga listrik Lampung dengan aplikasi Matpower 5.1. Pengujian dilakukan dengan memasang kapasitor tetap dengan nilai $X_C = 0,05$ pu dan $X_C = 0,06$ pu dan nilai induktansi paralel X_L diubah-ubah. Hasil pengujian menunjukkan bahwa aliran daya pada saluran juga berubah-ubah. Penempatan TCSC saat bekerja pada daerah kapasitif menyebabkan tegangan naik pada bus-bus yang berdekatan dengan bus Baturaja dan bus Bukit Kemuning. Sebaliknya, saat TCSC bekerja pada daerah induktif mengakibatkan tegangan turun pada bus-bus yang berdekatan dengan bus-bus tersebut. Oleh karena itu dalam pemasangan TCSC perlu memperhatikan batasan – batasan nilai variabel dari X_C dan X_L agar tidak menyebabkan jatuh tegangan pada bus penerima maupun pengirim.

Kata kunci : *Thyristor Controlled Series Compensator*, Penempatan, Sistem Tenaga Listrik Lampung.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATOR (TCSC) PLACEMENT ON BUKIT KEMUNING – BATURAJA LINE IN LAMPUNG'S ELECTRIC POWER SYSTEM

By

Ari Alfian

Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) is FACTS-based series compensator which aims to regulate the active power flow on a transmission line. By regulating the power flow in a transmission line can be set active power requirements of the load connected to the receiving bus or to sending bus or to other adjacent buses or otherwise regulate the ability of a power transmission line in the sending of active power.

The purpose of this thesis was to analyze the placement of TCSC on the transmission line between the bus Baturaja and Bukit Kemuning in the Lampung's electric power system. The analysis is performed by changing the reactance value of Xtcsc by changing the value of inductance in parallel with a fixed capacitor value. Power flow calculations performed using Matpower 5.1 software based on MATLAB programming language.

The results of this study using analysis of power flow in the Bukit Kemuning – Baturaja line in Lampung's electric power systems with Matpower 5.1 applications. Testing is performed by installing fixed capacitors with the value of $X_C = 0.05$ p.u. and $X_C = 0.06$ p.u. and parallel inductance value X_L is altered. The test results indicate that the power flow in the line is also changing. Placement TCSC which working on a capacitive zone causes the voltage increase on buses adjacent to the bus Baturaja and the bus Bukit Kemuning. Conversely, when the TCSC working on inductive zone resulting voltage drop in buses adjacent to these buses. Hence, in the TCSC installation need to consider the limits of the variable values of X_c and X_L in order not to cause a voltage drop on the receiving bus and sending bus.

Keywords: *Thyristor Controlled Series Compensator, Placement, Lampung's Electric Power System.*

**ANALISIS PENEMPATAN *THYRISTOR CONTROLLED SERIES
COMPENSATOR (TCSC)* PADA SALURAN BUKIT KEMUNING –
BATURAJA DI SISTEM TENAGA LISTRIK LAMPUNG**

**Oleh
ARI ALFIAN**

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2016

Judul Skripsi

**: ANALISIS PENEMPATAN *THYRISTOR*
CONTROLLED SERIES COMPENSATOR
(*TCSC*) PADA SALURAN BUKIT
KEMUNING – BATURAJA DI SISTEM
TENAGA LISTRIK LAMPUNG**

Nama Mahasiswa

: Ari Alfian

Nomor Pokok Mahasiswa : 0915031025

Jurusan

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Osea Zebua, S.T., M.T.
NIP 19700609 199903 1 002



Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.
NIP 19631114 199903 1 001

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro



Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.
NIP 19731128 199903 1 005

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: **Osea Zebua, S.T., M.T.**



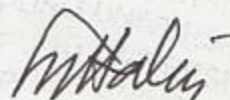
Sekretaris

: **Ir. Noer Soedjarwanto, M.T.**



Penguji

Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**



2. Dekan Fakultas Teknik


Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D.

NIP 19620717 198703 1 002 

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **28 Juli 2016**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan di dalam daftar pustaka. Selain itu saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 21 September 2016

ilis,

Ari Alfian
NPM. 0915031025



RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Bandar Lampung, pada tanggal 29 Desember 1988 sebagai anak kelima dari enam bersaudara, dari Bapak A. Sanu'i dan Ibu Bahriah (almh).

Penulis memasuki dunia pendidikan Sekolah Dasar (SD) di SD N 1 Sumur Putri, lulus pada tahun 2000, Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP N 3 Bandar Lampung, lulus pada tahun 2003, dan Sekolah Menengah Atas (SMA) di MA N 2 Bandar Lampung dan lulus pada tahun 2007.

Tahun 2009, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri). Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di lembaga kemahasiswaan yang ada di Jurusan Teknik Elektro dan Fakultas Teknik Universitas Lampung yaitu sebagai anggota Divisi Pengkaderan Himatro (Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro) pada tahun 2009 - 2012 dan anggota Divisi Pengkaderan Badan Eksekutif Mahasiswa (BEM) Fakultas 2011 - 2013. Selain itu, penulis juga aktif di Organisasi Ekstra Kuliah yaitu Himpunan Mahasiswa Islam (HMI) sebagai anggota dan pengurus Komisariat Teknik Universitas Lampung pada tahun 2010 - 2013. Disela padatnya jadwal kuliah dan

organisasi, penulis juga bergelut di bidang usaha dengan mendirikan Artha Cell sejak tahun 2012 – sekarang. Pada 1 Oktober – 1 November 2014, Penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. PLN (Persero) Distribusi Lampung dengan mengangkat judul “Studi Perbaikan Drop Tegangan pada Penyulang Katu PT. PLN (Persero) Distribusi Lampung dengan Pemasangan Kapasitor Bank”.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Karya ini kupersembahkan untuk

Ayah dan Ibu Tercinta

A.Sanu'i dan Bahriah (Almh)

Istri dan Anakku Tersayang

Evita Amalia, A.Md dan Raisyauqi Abhinaya

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater.



MOTTO

“... And seek help in patience and prayer”

(Al-Quran, Surat Al – Baqarah, 2 : 45)

*“Yang singkat itu ‘WAKTU’, Yang menipu itu ‘DUNIA’, Yang dekat itu
‘KEMATIAN’, Yang besar itu ‘NAFSU’, Yang berat itu ‘AMANAH’, Yang sulit
itu ‘IKHLAS’, Yang susah itu ‘SABAR’, Yang mudah itu ‘MEMBUAT DOSA’ ”*

(Imam Al- Ghazali)

“Dhuwur Wekasane Endheh Wiwitane”

(Filosofi Jawa)

“Berlelah-lelahlah, karena manisnya hidup terasa setelah lelah berjuang”

(Ari Alfian, S.T.)



SANWACANA

Alhamdulillah, puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala karunia, hidayah, serta nikmat yang diberikan, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “ANALISIS PENEMPATAN *THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATOR* (TCSC) PADA SALURAN BUKIT KEMUNING – BATURAJA DI SISTEM TENAGA LISTRIK LAMPUNG”.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas oleh dukungan dan bantuan dari banyak pihak. Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Suharno, M.Sc., Phd. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T.,M.Sc. selaku Pembimbing Akademik (PA), atas bimbingan dan perhatiannya.

4. Bapak Osea Zebua, S.T., M.T. selaku dosen Pembimbing Utama skripsi yang telah memberikan banyak ilmu, kritik dan saran, serta bimbingannya dalam penyelesaian skripsi ini.
5. Bapak Ir. Noer Soedjarwanto, M.T. selaku dosen Pembimbing Pendamping skripsi yang juga telah memberikan banyak ilmu, kritik dan saran, serta bimbingannya dalam penyelesaian skripsi ini.
6. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku dosen penguji skripsi yang juga telah memberikan banyak ilmu, kritik dan saran, serta bimbingannya dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Seluruh dosen dan karyawan Teknik Elektro Universitas Lampung yang telah memberikan masukan, dorongan dan ilmu yang sangat berarti bagi penulis.
8. Abah dan Almarhumah Emak yang selalu memberikan doa, dukungan dan kasih sayang yang tak terbatas sehingga penulis dapat menyelesaikan studinya sampai saat ini.
9. Istri dan anakku tercinta, Evita Amalia, A.Md dan Raisyauqi Abhinaya Alfian, belahan jiwaku, tujuan hidupku, masa depanku, segalanya bagiku, yang selalu sabar dan memberi dukungan serta semangat untuk menyelesaikan skripsi selama ini.
10. Keluarga Besar Teluk (Alm. Aa Syaf, Teh Tatik, Teh Erni, Ida, Adikku Adisty) atas bantuan, doa dan dukungannya sejak masuk sampai selesai kuliah.
11. Papah dan Mamah di Gn.3, Bang Herman, Yuk Eva, Yuk Novi, Dayah, Adek Rachma, yang juga sangat memberikan dukungan dan dorongan terus kepada penulis untuk menyelesaikan studinya.

12. Ateng 2009, rekan perjuangan sejak KP sampai penyelesaian skripsi, kawan lembur begadangan garap skripsi.
13. Sahabat sekaligus mentor atas teretusnya skripsi ini, Widi dan Jimmy atas ilmu dan bantuannya.
14. Sahabat–sahabat Teknik Elektro angkatan 2009, Botoy, Beta Duancuk, Abet, Topik, Ryo, Mbeu, Idon, Thaha, Ranny, Emak Diyah, Binsar, Robert, Ucup, Dimas, Luqvi, Cahyo, Songkot, Linggom, Hendi, Brando, Embul, dan semuanya yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, atas semangat, kebersamaan, doa dan bantuan kalian semua serta semua kawan – kawan di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Lampung yang selalu mendukung dan membantu selama studi sampai selesai.
15. Sahabat – sahabat semasa SMA, Maman golok, Midi, Ipul, Adun, Kholil, Mutia, Rani, Karimah, Aini, Dian, Diah, Asep, Anggi, dan lain – lain atas dukungannya selalu kepada penulis.
16. Rekan dan sahabat Alumni PPK pada Pilwakot Bandar Lampung 2015, Devis, Muhyi, Bang Yunan, Bang Alfi, Rahmad, Topik, dan semuanya atas dukungan, saran, bantuan dan nasehatnya.
17. Semua pihak yang telah membantu serta mendukung penulis dari awal kuliah hingga terselesaikannya skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan. Penulis menerima kritik dan saran yang membangun dari semua pihak untuk. Semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 22 September 2016

Ari Alfian

DAFTAR ISI

Halaman

DAFTAR ISI.....	i
DAFTAR GAMBAR.....	ii
DAFTAR TABEL	iii

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Rumusan Masalah	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Hipotesis.....	4

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Studi Aliran Beban.....	5
2.2. Prinsip Dasar Kompensasi Daya Reaktif	7
2.3. FACTS Devices	13
a. Sejarah Perkembangan Peralatan FACTS Devices	16
b. Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)	22

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	25
3.2. Alat dan Bahan Penelitian	25
3.3. Tahapan Penelitian	25
3.3.1. Mengidentifikasi Masalah.....	25
3.3.2. Studi Literatur	26
3.3.3. Pengumpulan dan Pemodelan Data.....	26
3.3.4. Simulasi TCSC di Sistem Tenaga Listrik Lampung.....	26

3.3.5. Analisa	33
3.4. Diagram Alir Penelitian	34
3.5. Diagram Alir Program.....	35

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Sistem Tenaga Listrik Lampung	36
4.1.1. Pemodelan Sistem Transmisi Lampung.....	37
4.1.2. Pemodelan Saluran Transmisi Lampung	40
4.1.3. Pemodelan Beban.....	44
4.2. Aliran Daya Sebelum Pemasangan TCSC	45
4.3. Aliran Daya Setelah Pemasangan TCSC pada Saluran Bukit Kemuning - Baturaja	47
4.3.1. Simulasi Aliran Daya Setelah Pemasangan TCSC dengan Kompensasi sebesar 28%	53

BAB V KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan	61
5.2. Saran.....	62

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Model Sistem Transmisi Daya	8
Gambar 2.2. Sistem Transmisi dengan Kompensasi Shunt (a) Model Sederhana (b) Diagram Fasa (c) Kurva Sudut Daya.....	11
Gambar 2.3. Sistem Transmisi dengan Kompensasi Seri (a) Model Sederhana (b) Diagram Fasa (c) Kurva Sudut Daya.....	12
Gambar 2.4. Peralatan FACTS Sederhana.....	15
Gambar 2.5. Saluran Transmisi dengan Peralatan FACTS yang Lebih Sedikit Kompleks.....	15
Gambar 2.6. Static Var Compensator (SVC).....	17
Gambar 2.7. NGH – <i>SubSynchronous Resonance</i>	17
Gambar 2.8. <i>Thyristor Controlled Series Compensator</i>	18
Gambar 2.9. <i>Static Synchronous Condenser</i> (STATCOM).....	19
Gambar 2.10. <i>Thyristor Controlled Phase angle Regulator</i>	20
Gambar 2.11. <i>Unified Power Flow Controller</i> (UPFC)	21
Gambar 2.12. Rangkaian Sederhana TCSC	22
Gambar 3.1. Tipikal Bus pada Sistem Tenaga.....	27
Gambar 3.2. Pemodelan Saluran Transmisi untuk Perhitungan Aliran Daya	29

Gambar 3.3. Model TCSC pada Saluran Transmisi.....	32
Gambar 3.4. Diagram Alir Penelitian	34
Gambar 3.5. Diagram Alir Program.....	35
Gambar 4.1. Pemodelan Diagram Satu Garis Sistem Transmisi Lampung	38
Gambar 4.2. Profil Tegangan Sebelum Pemasangan TCSC	47
Gambar 4.3. Hasil Simulasi Aliran Daya Setelah Pemasangan TCSC .	52
Gambar 4.4. Daerah Kerja Xtcsc dengan nilai X_c 0,05 p.u	53
Gambar 4.5. Daerah Kerja Xtcsc dengan nilai X_c 0,06 p.u	54
Gambar 4.6. Grafik perbandingan tegangan seluruh bus sebelum dan setelah pemasangan TCSC	57
Gambar 4.7. Pengaruh TCSC terhadap Tegangan Magnitude	58
Gambar 4.8. Pengaruh TCSC terhadap Sudut Tegangan	59
Gambar 4.9. Pengaruh TCSC terhadap Daya Aktif	60

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1. Jenis Bus di Sistem Tenaga Listrik Lampung pada Simulasi	30
Tabel 4.1. Pemodelan Nama dan Jenis Bus Jaringan Transmisi Lampung	39
Tabel 4.2. Jenis dan Panjang Saluran Transmisi Lampung	40
Tabel 4.3. Pemodelan Saluran Transmisi Lampung 150 kV	43
Tabel 4.4. Beban di Gardu Induk	44
Tabel 4.5. Hasil Perhitungan Tegangan, Sudut Tegangan, Daya Aktif dan Daya Reaktif Pembangkitan dan Beban Setiap Bus Sebelum Pemasangan TCSC.....	45
Tabel 4.6. Hasil aliran daya aktif dan daya reaktif serta rugi – rugi daya aktif dan daya reaktif di setiap saluran sebelum pemasangan TCSC.....	46
Tabel 4.7. Sampel dengan variasi nilai X_c dan X_L pada TCSC.....	48
Tabel 4.8. Hasil simulasi pada aliran daya setelah pemasangan TCSC pada saluran Bukit Kemuning – Baturaja	50
Tabel 4.9. Hasil Simulasi Aliran Daya dengan Derajat Kompensasi 28%	54
Tabel 5.0. Perubahan tegangan sebelum dan setelah pemasangan TSCS di seluruh Bus	56

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik pada saat ini mengalami peningkatan yang sangat drastis dikarenakan semakin padat pertumbuhan penduduk dan berkembangnya teknologi. Akan tetapi perkembangan sistem tenaga listrik tidak cukup mumpuni dalam mensuplai kebutuhan energi listrik yang dibutuhkan. Banyak permasalahan yang terjadi pada sistem ketenagalistrikan, mulai dari pembangkitan, penyaluran, sampai pendistribusian. Salah satunya adalah jarak yang cukup jauh antara pusat – pusat pembangkit listrik dengan pusat – pusat beban yang mengakibatkan ketidakstabilan tegangan listrik yakni drop tegangan atau kelebihan tegangan diluar batas toleransi. Banyak solusi yang telah dilakukan untuk terus meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik pada era globalisasi sekarang ini. Akan tetapi banyak juga solusi tersebut yang terkendala oleh lahan yang tidak mendukung dan biaya yang relatif mahal. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu alat yang dapat menyelesaikan permasalahan sistem tenaga listrik dan juga tidak memakan biaya terlalu besar dalam pengoperasiannya.

Salah satu cara untuk mengatasi kestabilan tegangan dan meningkatkan keandalan sistem adalah dengan menggunakan perangkat FACTS (*Flexible*

alternating current transmission systems). Perangkat FACTS dapat berfungsi secara optimal saat ditempatkan dititik tertentu dari jaringan dan mengatur besar nilai setting yang diberikan. Perangkat FACTS merupakan suatu peralatan kontrol yang ditempatkan pada sistem jaringan transmisi yang dapat meningkatkan kemampuan transfer daya. Salah satunya adalah pemasangan komponen TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*).

TCSC adalah salah satu peralatan FACTS yang berfungsi untuk mengatur daya reaktif, reaktansi sistem, dan menurunkan rugi – rugi daya pada sistem tenaga listrik. Parameter saluran transmisi seperti impedansi saluran dan tegangan pada bus tertentu dapat dikontrol dengan cepat dan efektif oleh TCSC. Selain itu juga *loadability* dari sistem yang ada dapat ditingkatkan sehingga sistem menjadi lebih fleksibel terhadap pembangkitan dan beban yang bervariasi.

Pada Tugas Akhir ini dibahas tentang penempatan optimal TCSC pada sistem tenaga listrik di wilayah Lampung khususnya pada saluran Bukittraja – Bukit Kemuning yang seringkali terjadi gangguan atau pemadaman akibat ketidakstabilan sistem tenaga listrik tersebut.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian yang dilakukan oleh penulis ini memiliki tujuan, antara lain:

1. Untuk mengetahui kondisi sistem kelistrikan Lampung sebelum dan setelah pemasangan TCSC pada saluran Bukit Kemuning - Baturaja.
2. Untuk mengoptimalkan kompensasi daya reaktif pada sistem kelistrikan Lampung saluran Bukit Kemuning – Baturaja.

3. Untuk menentukan efisiensi saluran transmisi setelah pemasangan TCSC.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana menentukan kondisi sistem kelistrikan Lampung sebelum dan setelah pemasangan TCSC.
2. Bagaimana menentukan lokasi penempatan TCSC yang tepat untuk mengoptimalkan kompensasi daya reaktif pada sistem tenaga listrik Lampung di saluran Bukit Kemuning - Baturaja.
3. Bagaimana menentukan efisiensi saluran transmisi setelah pemasangan TCSC.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan dari penelitian ini adalah:

1. Hanya meneliti penempatan TCSC di saluran Bukit Kemuning – Baturaja.
2. Analisis transien pada pemasangan TCSC tidak diikuti sertakan
3. Pemodelan TCSC pada penelitian ini dimodelkan secara statis
4. Pembangkit yang digunakan diasumsikan berjalan normal, tidak ada yang sedang dalam gangguan (perawatan, pembangkit lama, dll).
5. Tidak membahas derajat kompensasi secara detail.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini dapat diperoleh manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan gambaran dan alternatif solusi tentang pengembangan metode optimisasi dalam menjaga stabilitas sistem tenaga listrik.
2. Memberikan alternatif solusi untuk menempatkan peralatan TCSC *device* dan tetap menjaga batasan tegangan setiap bus dan batasan pembebanan saluran yang telah ditentukan.

1.6 Hipotesis

Dengan memasang TCSC pada saluran Baturaja – Bukit Kemuning maka diharapkan akan terdapat penambahan aliran daya aktif pada sistem tenaga listrik tersebut dan sekaligus mengurangi rugi – rugi daya reaktif.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Studi 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 relative sangat banyak^[1].

Studi aliran beban bertujuan untuk mengetahui besar aliran daya, baik daya aktif maupun daya reaktif. Studi aliran beban juga bertujuan untuk mengetahui besar tegangan sistem pada terminal atau bus tertentu dan besar frekuensi yang diijinkan pada batas – batas tertentu^[2].

Secara umum tujuan daripada studi aliran beban adalah sebagai berikut :

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

Didalam studi aliran daya, pada tiap – tiap bus terdapat 4 (empat) macam besaran yaitu :

1. Daya real atau daya aktif, simbolnya adalah P dengan satuan Watt.
2. Daya reaktif, simbolnya adalah Q dengan satuan Var.
3. Harga skalar tegangan, simbolnya adalah $|V|$ dengan satuan Volt.
4. Sudut fasa tegangan dengan simbol θ dan bus – bus yang 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 sebaliknya bus yang dipilih untuk bus ini adalah bus yang berdaya besar.
 - b. Voltage Controlled Bus (PV) biasa disebut juga 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^[1,2].

2.2 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 diatas merupakan ukuran kualitas suatu pengiriman daya^[4].

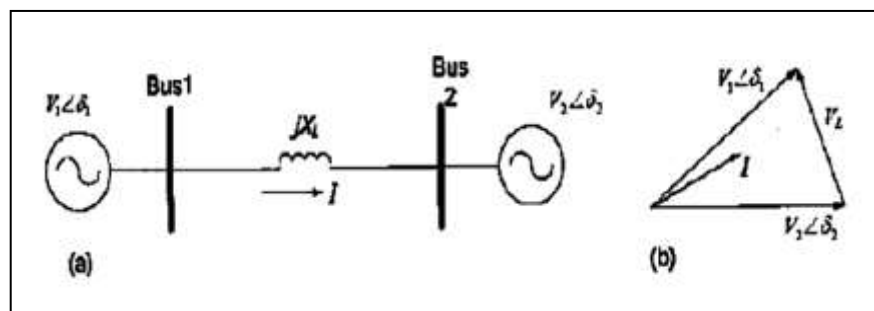
Agar efisiensi dan kemampuan operasi sistem tenaga meningkat, pengaturan tegangan dan daya reaktif harus memenuhi sasaran sebagai berikut :

- Tegangan yang dipakai pada terminal – terminal peralatan dalam sistem tersebut harus dalam batas yang diijinkan. Jika menggunakan tegangan diluar 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 untuk memaksimalkan penyaluran energi pada Saluran Transmisi Tenaga Listrik (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 bias juga diartikan sebagai proses pengimbangan. Kompensasi pada STTL pada dasarnya adalah memasukkan atau menyisipkan dengan sengaja peralatan penghasil/penyerap daya reaktif pada sistem tenaga listrik^[4].



Gambar 2.1. Model Sistem Transmisi Daya^[5]

Gambar (a) diatas menunjukkan model sederhana dari sistem transmisi daya. Dua buah jaringan daya dihubungkan dengan sebuah saluran transmisi yang dimisalkan tidak mengandung rugi daya (*lossless*) 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 $\delta = \delta_1 - \delta_2$. Sedangkan diagram phasor tegangan dan arus dinyatakan pada gambar (b).

Besaran arus pada saluran transmisi dinyatakan dengan persamaan berikut ini :

$$I = \frac{V_L}{X_L} = \frac{|V_1 \angle \delta_1 - V_2 \angle \delta_2|}{X_L} \dots\dots\dots (2.1)$$

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

$$I_{d1} = \frac{V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } I_{q1} = \frac{V_1 - V_2 \cos \delta}{X_L} \dots\dots\dots (2.2)$$

Daya aktif dan reaktif pada bus 1, adalah :

$$P_1 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } Q_1 = \frac{V_1 (V_1 - V_2 \cos \delta)}{X_L} \dots\dots\dots (2.3)$$

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

$$I_{d2} = \frac{V_1 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } I_{q2} = \frac{V_2 - V_1 \cos \delta}{X_L} \dots\dots\dots (2.4)$$

Daya aktif dan reaktif pada bus 2, adalah :

$$P_2 = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X_L} \text{ dan } Q_2 = \frac{V_2 (V_2 - V_1 \cos \delta)}{X_L} \dots\dots\dots (2.5)$$

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 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 (2.1) sampai dengan (2.5) terlihat bahwa untuk mengontrol daya / arus aktif dan reaktif dapat dilakukan dengan mengatur tegangan, sudut fasa dan impedansi dari saluran transmisi.

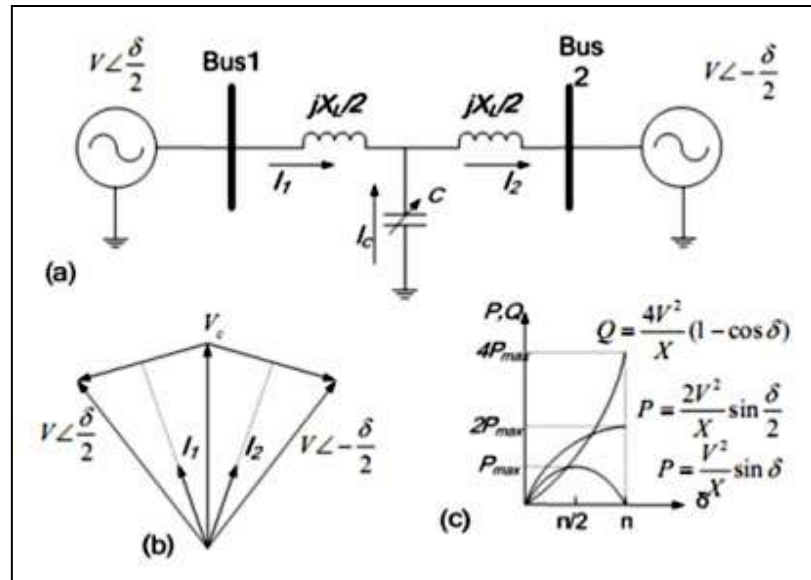
Pada umumnya kompensasi sistem transmisi dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu :

a. Kompensasi Shunt^[5]

Kompensasi reaktif shunt digunakan pada sistem transmisi untuk mengatur tegangan, memperbaiki kualitas tegangan, dan mempertahankan kestabilan sistem tenaga listrik. Selain itu reaktor/induktor 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 2.2a. Besaran tegangan pada kedua bus adalah V , dengan sudut fasa δ . Saluran transmisi yang dianggap *lossless* dinyatakan dengan

reaktansi X_L . Pada bagian tengah dari saluran, sebuah kapasitor terhubung secara shunt. Besaran tegangan pada titik sambungan adalah V .



Gambar 2.2. Sistem transmisi dengan kompensasi shunt (a) model sederhana (b) Diagram fasa (c) Kurva sudut daya^[5]

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

$$P_1 = 2 \frac{V^2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \dots\dots\dots (2.6)$$

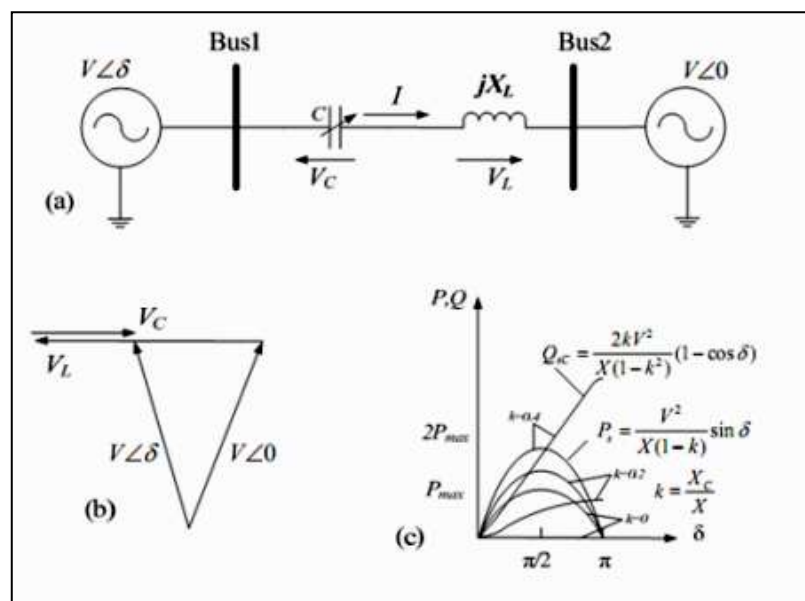
Daya reaktif yang diinjeksikan oleh kapasitor untuk mengatur tegangan pada bagian tengah saluran transmisi adalah :

$$Q_c = 4 \frac{V^2}{X_L} \left(1 - \cos \frac{\delta}{2}\right) \dots\dots\dots (2.7)$$

Dari kurva sudut daya pada gambar 2.2.c 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^[5]

Kompensasi seri dimaksudkan untuk mengontrol langsung semua impedansi seri dari saluran transmisi. Berdasarkan rumus (2.1) sampai dengan rumus (2.5), 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.



Gambar 2.3. Sistem transmisi dengan kompensasi seri. (a) model sederhana (b) diagram fasa (c) kurva sudut daya^[5]

Gambar diatas menjelaskan gambar sistem transmisi dengan kompensasi seri. Model sederhana dari saluran transmisi dengan kompensasi seri digambarkan pada gambar 2.3a. Besaran tegangan dari kedua bus adalah V dan sudut fasa δ . Saluran transmisi yang dianggap lossless dinyatakan dengan reaktansi X_L . Kapasitor yang terkontrol dipasangkan secara seri dengan saluran transmisi dengan tegangan V_c . Sedangkan diagram fasa nya tercantum pada gambar 2.3b.

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

$$X_C = kX_L \dots\dots\dots (2.8)$$

Sehingga keseluruhan impedansi seri pada saluran adalah :

$$X = X_L - X_C = (1 - k)X_L \dots\dots\dots (2.9)$$

Daya aktif yang ditransmisikan adalah :

$$P = \frac{V^2}{(1-k)X_L} \sin \delta \dots\dots\dots (2.10)$$

Daya reaktif yang diberikan oleh kapasitor dapat dihitung sebagai berikut :

$$Q_C = 2 \frac{V^2}{X_L} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \dots\dots\dots (2.11)$$

Gambar 2.3c 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.

2.3. FACTS Devices

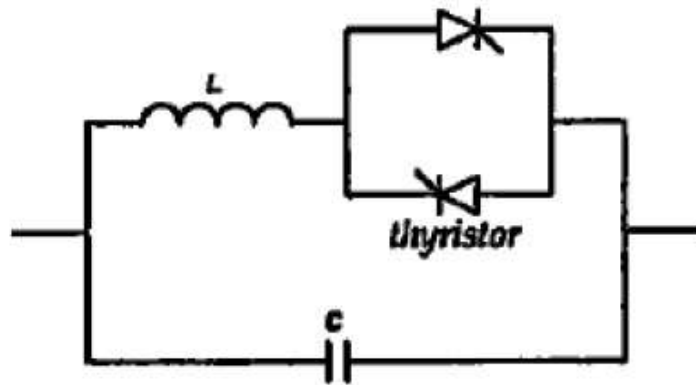
FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) sudah banyak digunakan untuk menangani masalah penyaluran daya. Sebagai peralatan elektronika daya yang tersusun sendiri, peralatan FACTS sangat memungkinkan diaplikasikan pada saluran transmisi untuk meningkatkan kemampuan penyaluran daya saluran. 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 perusahaan listrik. Kemampuan yang dimiliki oleh peralatan FACTS antara lain yaitu meningkatkan kestabilan transmisi tenaga, memperbaiki nilai tegangan dan keseimbangan daya reaktif, dan memperbaiki pembagian beban pada saluran parallel^[6].

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 2.1 sebelumnya, 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 dengan persamaan sebagai berikut :

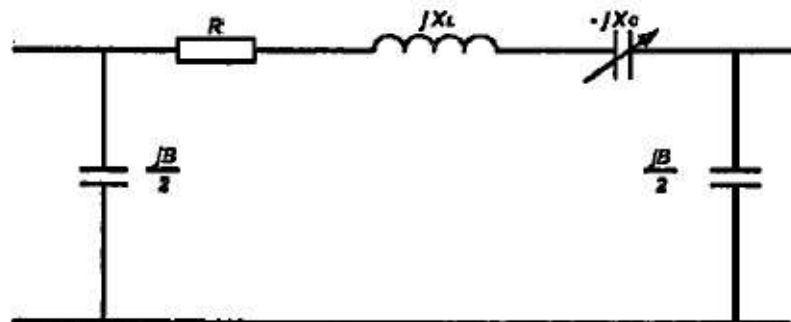
$$P_{12} = \frac{V_1 - V_2}{X_L} \sin \delta \dots\dots\dots (2.12)$$

Pada persamaan (2.12), P_{12} dapat diubah – ubah dengan cara mengontrol nilai X_L dengan sebuah kontroler. Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini yaitu jenis peralatan FACTS sederhana yang dapat memiliki karakteristik induktif atau kapasitif. Meskipun kombinasi dari kedua tipe dapat menguntungkan dalam tenaga, namun penalarannya harus dilakukan secara cermat.



Gambar 2.4. Peralatan FACTS sederhana^[6]

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 pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.5. Saluran transmisi dengan peralatan FACTS yang sedikit lebih kompleks^[6]

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

$$X = X_L - X_c = (1 - k)X_L \dots\dots\dots (2.13)$$

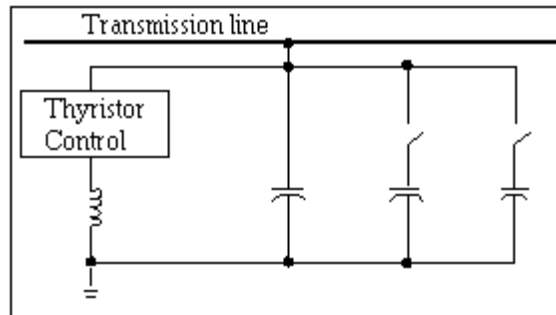
Dengan $0 \leq k \leq 0.8$ dimana X adalah reaktansi FACTS dan k adalah derajat kompensator.

a. Sejarah Perkembangan Peralatan FACTS Devices^[3]

Teknologi FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) merupakan peralatan kontrol aliran daya sebagaiuna dan fleksibel pada jaringan transmisi, yang dalam perkembangannya telah mengalami dua generasi.

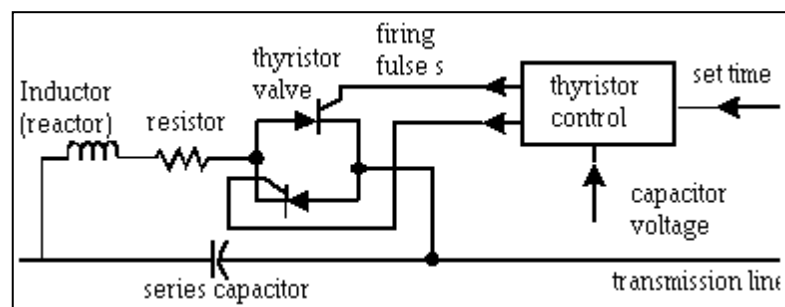
Generasi pertama menghasilkan dua jenis peralatan. Alat pertama diberi nama *Static Var Compensator* (SVC) yang sudah diimplementasikan pada jaringan transmisi listrik semenjak pertengahan tahun 70-an. SVC berfungsi sebagai pemelihara kestabilan kondisi *steady state* dan dinamika tegangan dalam batasan 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 system jaringan transmisi listrik AC. Lain dari itu, SVC juga didapati sangat rendah efisiensinya jika terjadi turunnya tegangan dari transmisi secara drastis. Gambar 2.6 menunjukkan contoh dari topologi SVC.



Gambar 2.6. Static Var Compensator (SVC)^[3]

Alat berikutnya yang dikembangkan pada generasi pertama diberi nama NGH-SSR (Narain G. Hingorani – *Sub Synchronous Resonance*). Alat ini dirancang untuk mengatasi permasalahan *Sub Synchronous Resonance* (SSR) yang ditemukan pada jaringan transmisi listrik AC. Jaringan transmisi 500 kV *Southern California Edison* dijadikan tempat pemasangan pertama dari alat ini pada tahun 1980-an setelah SSR mengakibatkan kerusakan fatal pada salah satu generatornya.



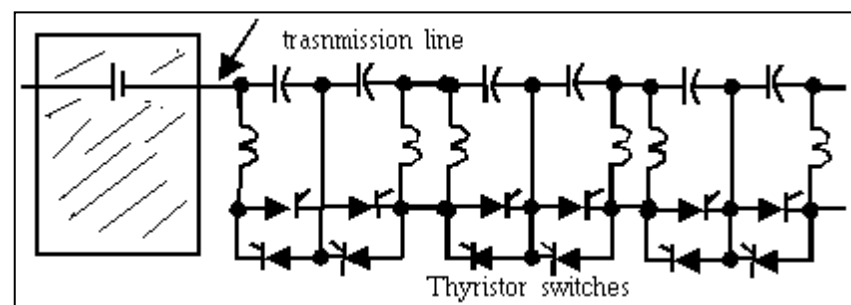
Gambar 2.7. NGH-SubSynchronous Resonance^[3]

Gambar diatas menunjukkan gambar NGH-SSR yang 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 Compensator* (TCSC).

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

kedua FACTS ini banyak hal baru yang telah dikembangkan dari generasi sebelumnya. Salah satunya adalah TCSC ini yang berfungsi sebagai pengendali impedansi dari jaringan transmisi. Seperti diketahui bersama impedansi sepanjang jaringan transmisi umumnya bersifat induktif sedangkan yang bersifat resistif hanya berkisar 5 sampai dengan 10 persen.

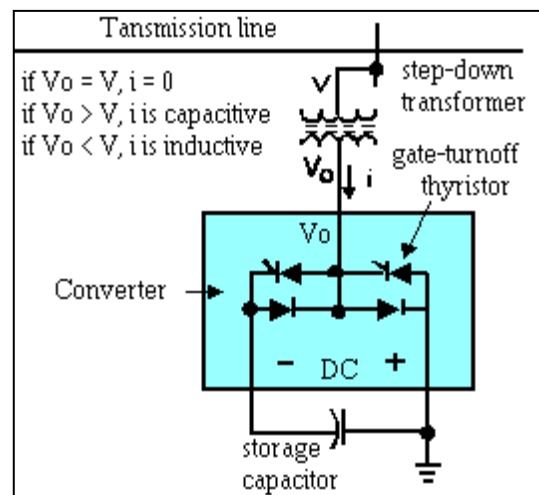
Artinya jika kita mampu mengendalikan impedansi transmisi yang bersifat induktif ini pada kondisi stabil (*steady state impedance*) akan menghasilkan manfaat yang besar pada sistem tenaga listrik. Hal ini dapat ditempuh dengan cara penambahan kapasitor dan induktor secara seri. Penghubungan kapasitor secara seri ini akan berdampak dalam pengurangan impedansi pada transmisi sedangkan penghubungan induktor secara seri akan berakibat kenaikan impedansi pada transmisi yang sama.



Gambar 2.8. Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)^[3]

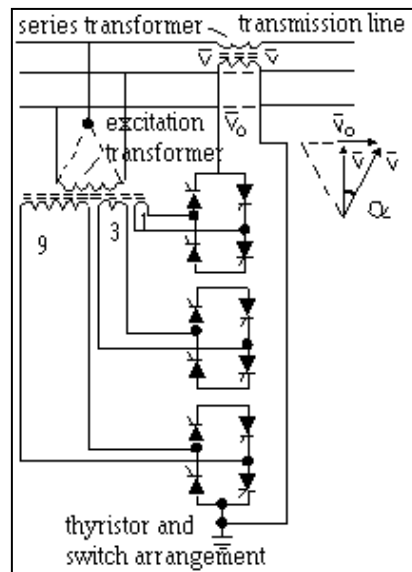
Gambar diatas menunjukkan contoh dari TCSC yang telah dipasang pada jaringan transmisi 500 kV milik *Bonneville Power Administration* (BPA) di Negara bagian Oregon. Studi kasus pemasangan TCSC oleh Electric Power Research Institute (EPRI) pada satu jaringan transmisi ini menunjukkan bahwa TCSC berhasil meningkatkan kualitas aliran daya (dalam MW) sebanyak 30% dengan sekaligus menjaga stabilitas sistem jaringan transmisi tersebut.

Alat yang kedua diberi nama *Static Synchronous Condenser* (STATCOM). STATCOM berfungsi sebagai penyedia Volt Amp Reactive (VAR) untuk menjaga kestabilan tegangan pada jaringan transmisi yang panjang dan berbeban tinggi (*heavily loaded*). Pada akhirnya nanti, STATCOM diharapkan dapat menggantikan pemakaian alat yang kini umum dipasang yaitu *Rotating Synchronous Condenser*. STATCOM adalah alat pertama FACTS yang menggunakan tipe *thyristor* berbeda dari peralatan FACTS sebelumnya. Jenis *thyristor* yang dipakai pada STATCOM adalah jenis *Gate Turned-Off* (GTO).



Gambar 2.9. Static Synchronous Condenser (STATCOM)^[3]

Selanjutnya adalah alat FACTS yang disebut TCPR (*Thyristor Controlled Phase angle Regulator*). TCPR berfungsi sebagai pengendali selisih sudut fasa pada tegangan dari kedua ujung jaringan transmisi yang sama. Fungsi ini dimungkinkan dengan cara penyuntikan tegangan secara seri pada jaringan transmisi listrik.

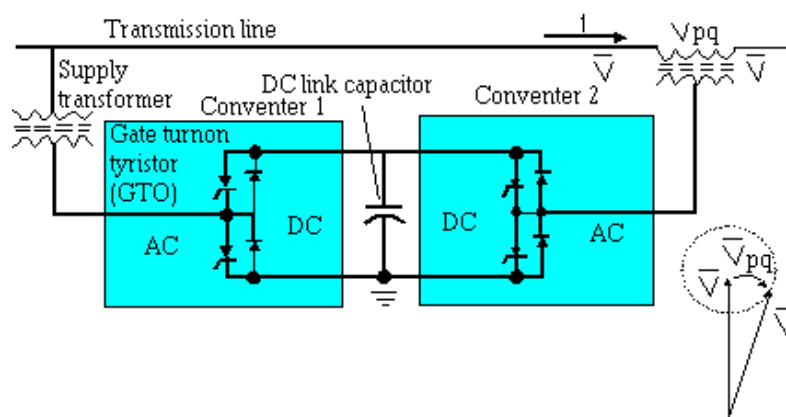


Gambar 2.10. Thyristor Controlled Phase angle Regulator (TCPR)^[3]

Gambar 2.10 menunjukkan konsep dari TCPR ini. Penambahan sudut fasa 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.

Alat selanjutnya adalah *Unified Power Flow Controoler* (UPFC). UPFC adalah bentuk dari konsep lain untuk pengaturan selisih fasa seperti pada TCPR. Dimana perancangan UPFC berbasis inverter dengan menggunakan *thyristor*., vector tegangan V_{pq} yang dihasilkan oleh inverter disuntikkan secara seri ke jaringan transmisi. Tegangan searah (dc) yang digunakan inverter ini didapatkan dari hasil penyearah 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. 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. Karena hal inilah yang selanjutnya menjadi suatu keuntungan ketika pemasangan UPFC yang dapat mengendalikan ketiga parameter tersebut, maka tidak hanya sistem jaringan transmisi yang akan menjadi lebih baik, akan tetapi menjadi lebih murah dan mudah dalam pemeliharaan bahkan pengoperasiannya. Dengan kata lain, pemasangan satu UPFC akan sama halnya dengan pemasangan alat TCSC, STATCOM dan TCPR dalam waktu yang bersamaan. Berikut adalah gambar dari *Unified Power Flow Controller (UPFC)* :



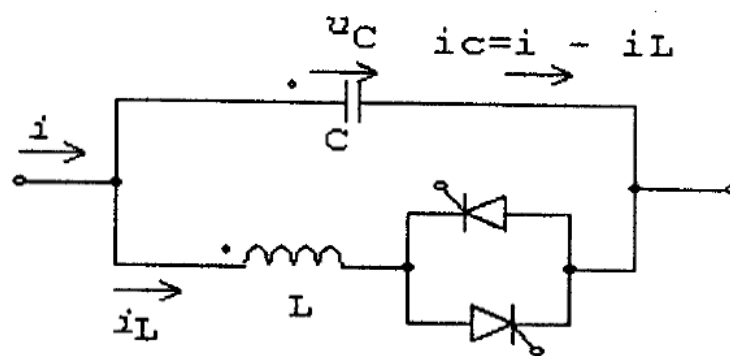
Gambar 2.11. Unified Power Flow Controller (UPFC)^[3]

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. Sedangkan TCSR (*Thyristor Controlled Series Reactor*) adalah peralatan FACTS yang dapat digunakan pada jaringan transmisi yang membutuhkan pengurangan beban dengan cepat dan pembatasan dari arus gangguan. TCSR juga dapat digunakan bersama TCSC pada jaringan transmisi yang memerlukan kompensasi induktif seri yang tinggi. Terakhir adalah TCVL

(*Thyristor Controlled Voltage Limiter*) yaitu peralatan FACTS yang berfungsi sebagai pembatas kelebihan tegangan (*over voltage*) selama selang waktu yang relatif cukup lama yang dapat merusak peralatan pada jaringan transmisi.

b. Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)^[7]

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 penyalan TCR yang dihubungkan parallel dengan fixed capasitor. Adanya perubahan impedansi pada jaringan memberikan efek peningkatan transfer daya^[7]. Komponen utama TCSC adalah TCR yang tersusun dari sebuah induktor yang seri dengan *thyristor* dan parallel dengan kapasitor. TCSC mampu mengatur reaktansi saluran transmisi dengan melakukan pengaturan sudut penyalan *thyristor*. Bentuk TCSC ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.12. Rangkaian sederhana TCSC^[7]

Untuk mencegah terjadinya kompensasi berlebihan, derajat kompensasi pada TCSC juga harus diatur. Dalam hal ini derajat kompensasi TCSC diatur pada nilai 20% induktif dan 80% kapasitif atau $-0,8 X_{line}$ hingga $0,2 X_{line}$ [8]. Sedangkan 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 :

$$B^{TCSC}(\alpha) = B_L \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \dots\dots\dots (2.14)$$

$$B_L = \frac{1}{\omega L}, B_C = -\omega C \dots\dots\dots (2.15)$$

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 berikut :

$$X_{Lmin} = \frac{1}{1/X_L + 1/X_C} = \frac{1}{B_L + B_C} \dots\dots\dots (2.16)$$

$$X_{Cmax} = X_C = 1/B_C \dots\dots\dots (2.17)$$

Nilai – nilai ini dapat dicapai dengan mengatur nilai α pada persamaan 2.14. TCSC memiliki daerah resonansi pada α_{res} sehingga sudut penyalan ini reaktansi induktif dan kapasitif beresonansi. Sudut *security* margin δ harus dijaga di sekitar sudut α_{res} :

$$\alpha < \alpha_{res} - \delta \text{ dan } \alpha < \alpha_{res} + \delta \dots\dots\dots (2.18)$$

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

$$X_{min} \leq X_{TCSC} \leq X_{max} \dots\dots\dots (2.19)$$

$$X_{min} = X_{TCSC}(\alpha_{res} + \delta) \dots\dots\dots (2.20)$$

$$X_{max} = X_{TCSC}(\alpha_{res} - \delta) \dots\dots\dots (2.21)$$

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan dari bulan November 2015 s.d. Juni 2016 dan bertempat di Laboratorium Sistem Tenaga Listrik Universitas Lampung. Sedangkan, pengambilan data direncanakan akan dilakukan di PT. PLN (Persero).

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan untuk membantu pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Satu buah Laptop/PC
2. Software Matlab
3. Data dari PT PLN (Persero)

3.3. Tahapan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan, yaitu sebagai berikut:

3.3.1. Mengidentifikasi Masalah

Di tahap ini penulis mengidentifikasi permasalahan yang terdapat di sistem tenaga listrik. Dalam tugas akhir ini penulis mengangkat

permasalahan tentang penggunaan TCSC untuk optimalisasi aliran daya di sistem tenaga listrik wilayah Lampung.

3.3.2. Studi Literatur

Ini merupakan tahapan dimana penulis mengumpulkan dan mempelajari tentang studi aliran daya, TCSC dan manfaatnya dalam penyaluran tenaga listrik. Selanjutnya literatur – literatur tersebut digunakan untuk dasar dalam mengerjakan tugas akhir ini.

3.3.3. Pengumpulan dan Pemodelan Data

Langkah selanjutnya yang dilakukan penulis adalah mengumpulkan data – data yang diperlukan dalam penulisan tugas akhir ini. Data – data yang dikumpulkan berasal dari PT PLN (Persero). Data yang dikumpulkan tersebut adalah:

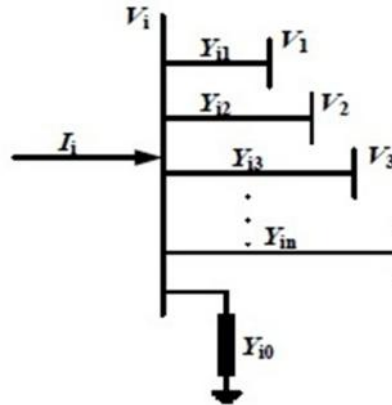
1. Data Jaringan Listrik Wilayah Lampung
2. Data Spesifikasi Generator
3. Data Beban

3.3.4. Simulasi TCSC di Sistem Tenaga Listrik Lampung

Penelitian tahap berikutnya berlanjut ke proses simulasi. Data – data yang telah terkumpul sebelumnya dilakukan perhitungan studi aliran daya dengan menggunakan program Matlab. Langkah – langkah perhitungan:

1. Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya dilakukan untuk mengetahui sudut dan besar tegangan pada setiap bus, impedansi saluran, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada saluran transmisi. Representasi dari saluran transmisi ditunjukkan seperti pada gambar 3.1 dibawah ini :



Gambar 3.1. Tipikal bus pada sistem tenaga^[9]

Dari gambar 3.1, tegangan bus dan arus dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{i1} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{in} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{ni} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.1)$$

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V_{bus} \dots\dots\dots (3.2)$$

Nilai arus dapat dicari dengan menggunakan hokum Kirchoff sebagai berikut^[9]:

$$I_i = Y_{i0}V_i + Y_{i1}(V_i - V_1) + Y_{i2}(V_i - V_2) + \cdots + Y_{in}(V_i - V_n) \dots\dots (3.3)$$

atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j, \quad j \neq i \dots\dots\dots (3.4)$$

dengan I_i merupakan arus yang masuk ke bus i, V_i adalah tegangan pada bus i, dan Y_{ij} adalah admitansi antara bus i dan j.

Dari persamaan (3.4), arus yang memasuki bus dapat ditulis ulang dalam bentuk matriks admitansi seperti persamaan berikut^[9] :

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \dots\dots\dots (3.5)$$

Substitusi persamaan (3.3) dan (3.5), maka diperoleh :

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle \theta_{ij} - \delta_i) (\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j) \dots\dots\dots (3.6)$$

dengan memisahkan bagian *real* dan imajiner, maka didapatkan :

$$P_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (3.7)$$

$$Q_i = - \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| |V_i| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots\dots\dots (3.8)$$

dengan I_i merupakan arus pada bus i , V_i adalah tegangan pada bus i , V_j adalah tegangan pada bus j , Y_{ij} adalah admitansi antara bus i dan j , P_i adalah daya aktif pada bus i , Q_i adalah daya reaktif pada bus i , θ_{ij} adalah sudut polar admitansi Y_{ij} , dan δ_j adalah sudut tegangan V_j .

Matriks Jacobian memberikan hubungan antara perubahan kecil pada sudut tegangan $\Delta\delta^{(k)}_i$ dan *magnitude* tegangan $\Delta|V^{(k)}_i|$ dengan perubahan kecil pada daya aktif dan reaktif $\Delta P^{(k)}_i$ dan $\Delta Q^{(k)}_i$. Dalam bentuk yang lebih singkat, matriks diatas dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta|V| \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.9)$$

$\Delta P^{(k)}_i$ dan $\Delta Q^{(k)}_i$ adalah selisih antara nilai yang diharapkan dan nilai sebenarnya atau dikenal sebagai daya residu, dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \dots\dots\dots (3.10)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \dots\dots\dots (3.11)$$

sehingga didapatkan nilai tegangan dan sudut baru, yaitu :

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \dots\dots\dots (3.12)$$

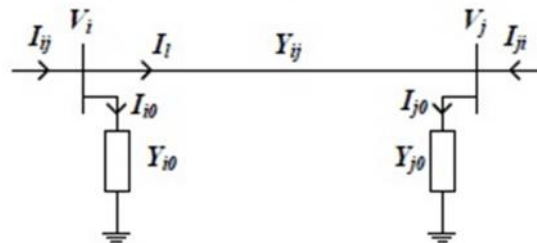
$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \dots\dots\dots (3.13)$$

Langkah selanjutnya adalah perhitungan rugi – rugi saluran. Aliran arus diasumsikan seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Jika arus mengalir dari i ke j, maka :

$$I_{ij} = I_1 + I_{i0} = Y_{ij}(V_i - V_j) + Y_{i0}V_i \dots\dots\dots (3.14)$$

Apabila ditinjau dari sisi bus i, maka arus yang mengalir bernilai negative seperti persamaan berikut :

$$I_{ji} = -I_1 + I_{j0} = Y_{ij}(V_j - V_i) + Y_{j0}V_j \dots\dots\dots (3.15)$$



Gambar 3.2. Pemodelan saluran transmisi untuk perhitungan aliran daya^[9]

Daya kompleks S_{ij} dari bus i ke j dan S_{ji} dari bus j ke i adalah :

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i(V_i^* - V_j^*)Y_{ij}^* + V_i V_i^* Y_{i0}^* \dots\dots\dots (3.16)$$

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* = V_j(V_j^* - V_i^*)Y_{ij}^* + V_j V_j^* Y_{j0}^* \dots\dots\dots (3.17)$$

$$S_{Lij} = S_{ij} + S_{ji} \dots\dots\dots (3.18)$$

dimana S_{Lji} merupakan total rugi daya saluran dari i ke j (MVA).

2. Melakukan pemodelan Sistem Tenaga Listrik (STL) Lampung.

Dalam melakukan simulasi ini dilakukan pemodelan jaringan, beban, dan generator di STL Lampung. Jaringan tenaga listrik dimodelkan dalam jenis bus, penomoran bus, resistansi saluran, impedansi saluran,

dan suseptansi. Beban dimodelkan dalam pengukuran daya maksimum yang dalam satu hari. Sedangkan, generator dimodelkan dalam kapasitas generator, resistansi generator, dan kondisi eksitasi generator.

Sistem tenaga listrik Lampung terdiri dari 24 bus dengan rincian 9 buah bus generator dan 15 bus beban. Salah satu bus generator dijadikan bus referensi. Tabel 3.1 merupakan rincian dari bus di sistem tenaga listrik Lampung untuk penelitian ini.

Tabel 3.1. Jenis Bus di Sistem Tenaga Listrik Lampung pada Simulasi

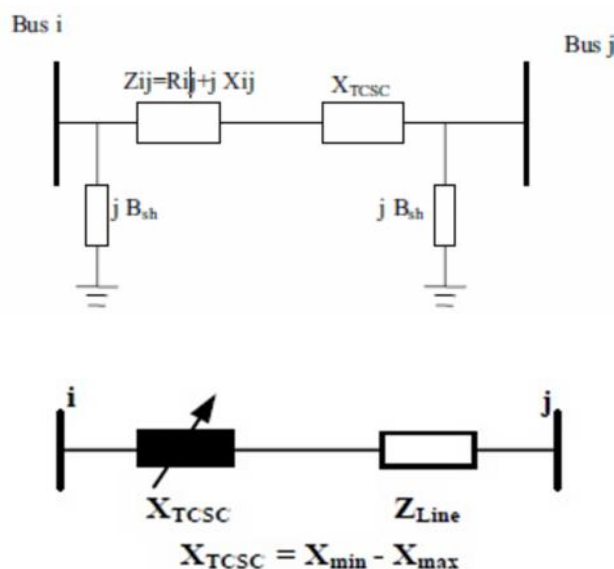
NO	Nama Bus	Jenis Bus
1	BUKIT ASAM	Bus Referensi
2	BATURAJA	Bus Beban
3	BLAMBANGAN UMPU	Bus Beban
4	BUKIT KEMUNING	Bus Beban
5	BESAI	Bus Generator
6	KOTABUMI	Bus Beban
7	MENGKALA	Bus Beban
8	GUMAWANG	Bus Beban
9	ADIJAYA	Bus Beban
10	TEGINENENG	Bus Generator
11	PAGELARAN	Bus Beban
12	BATUTEGI	Bus Generator
13	ULU BELU	Bus Generator

14	SEPUTIH BANYAK	Bus Beban
15	METRO	Bus Beban
16	NATAR	Bus Beban
17	TELUK BETUNG	Bus Generator
18	SUKARAME	Bus Beban
19	TARAHAN	Bus Generator
20	SUTAMI	Bus Beban
21	NEW TARAHAN	Bus Generator
22	SEBALANG	Bus Generator
23	SRIBAWONO	Bus Beban
24	KALIANDA	Bus Beban

Pada sistem dalam simulasi digunakan 3 jenis bus, yaitu bus referensi, bus generator, dan bus beban. Gardu Induk (GI) New Tarahan, GI Tarahan, Teluk Betung, Tegineneng, Sebalang, Ulubelu, Besai, dan Batutege sebagai bus generator. Sedangkan, yang lainnya sebagai bus beban. Sistem tenaga listrik Wilayah Lampung menggunakan interkoneksi dengan Sumatera Selatan dan terhubung pada GI Bukit Asam. GI ini menyuplai daya ke Lampung sehingga diikutsertakan dalam penelitian. Daya yang dikirim dari GI Bukit Asam dianggap tetap dan dijadikan sebagai bus referensi.

3. Melakukan simulasi pemodelan optimalisasi aliran daya dengan menggunakan TCSC.

Pada tahapan ini dilakukan simulasi optimalisasi aliran daya dengan menambahkan TCSC sebagai kompensasi daya reaktif di bus Baturaja dan Bukit Kemuning. TCSC sendiri secara seri dipasang ke saluran transmisi. Efek pemasangan TCSC pada saluran transmisi digunakan sebagai reaktansi terkendali yang akan mengkompensasi reaktansi induktif pada saluran transmisi. TCSC akan mengurangi reaktansi yang dikirim pada saluran dimana TCSC akan terpasang. Pemasangan TCSC ini nantinya akan memaksimalkan daya yang dikirim pada saluran dan akan mengurangi rugi daya reaktif. Pada penelitian ini, TCSC akan bertindak sebagai reaktif kapasitan. Gambar 3.3 adalah bentuk tampilan model saluran transmisi dengan TCSC yang terhubung antar bus i dan bus j. Saluran transmisi diasumsikan sebagai parameter ekivalen yang terhubung antar bus.



Gambar 3.3. Model TCSC pada Saluran Transmisi^[8]

Hubungan antara rating TCSC dengan reaktansi saluran transmisi dinyatakan sebagai berikut :

$$X_{total} = X_{saluran} + X_{TCSC} \dots\dots\dots (3.19)$$

$$X_{TCSC} = r_{TCSC} \times X_{saluran} \dots\dots\dots (3.20)$$

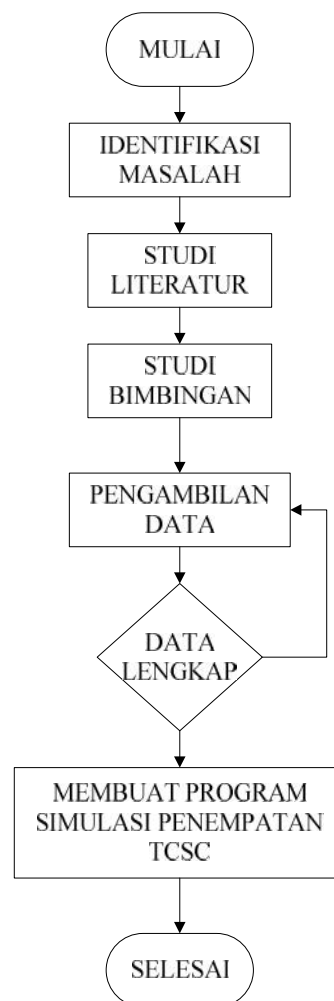
dimana $X_{saluran}$ merupakan reaktansi saluran transmisi dan r_{TCSC} adalah rating kompensasi TCSC.

3.3.5. Analisa

Langkah berikut adalah tahapan terakhir dalam tugas akhir ini. Dari hasil simulasi akan didapatkan hasil optimalisasi aliran daya dengan menggunakan TCSC di bus Baturaja – Bukit Kemuning. Dari hasil simulasi yang dilakukan diharapkan dapat menurunkan tegangan turun dan susut daya. Ini karena TCSC dapat mengkompensasi daya reaktif sehingga memperbesar arus aktif pada bus tersebut.

3.4. Diagram Alir Penelitian

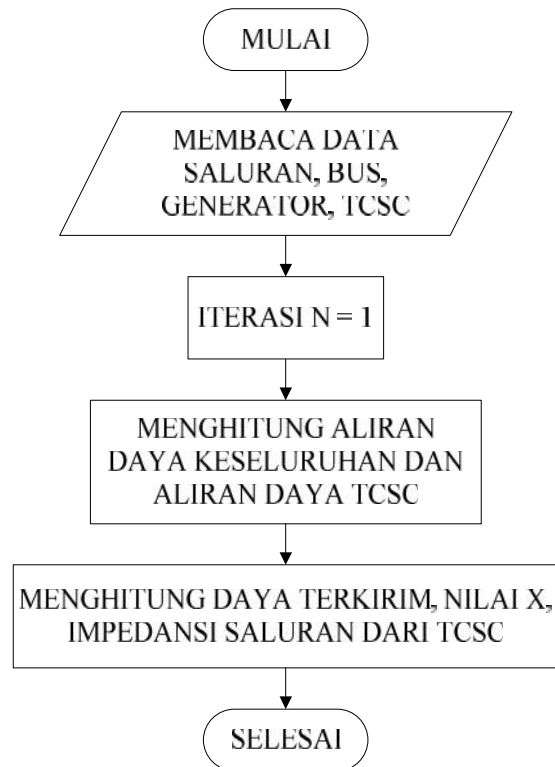
Berikut merupakan diagram alir penelitian tugas akhir yang penulis lakukan :



Gambar 3.4. Diagram Alir Penelitian

3.5. Diagram Alir Program

Berikut merupakan diagram alir dari program tugas akhir yang penulis lakukan:



Gambar 3.5. Diagram Alir Program

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan simulasi hasil dan pembahasan yang diambil setelah penulis selesai melaksanakan tugas akhir, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan, kondisi tegangan bus pada sistem kelistrikan Lampung sebelum pemasangan TCSC sudah sesuai dengan standar tegangan yaitu 0,95 – 1,05 p.u.
2. Pemasangan TCSC dapat mengatur aliran daya pada saluran antara Bukit Kemuning – Baturaja dengan mengubah-ubah besar nilai induktor paralel.
3. Pemasangan TCSC dengan nilai – nilai tertentu dapat menyebabkan jatuh tegangan pada bus penerima Baturaja dan bus pengirim Bukit Kemuning sekaligus merubah arah aliran daya.
4. Pemasangan TCSC dapat mempengaruhi tegangan di bus – bus yang berdekatan. Bila TCSC bekerja pada daerah kapasitif, artinya X_{tcsc} bernilai negatif dapat menyebabkan tegangan naik di sekitar saluran antara Bukit Kemuning Baturaja, sebaliknya jika TCSC bekerja pada daerah induktif.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil simulasi dan pembahasan serta kesimpulan, maka untuk pengembangan penulis memberikan saran sebagai berikut:

1. PT. PLN (Persero) wilayah Lampung sebagai penyelenggara penyedia kelistrikan disarankan untuk memasang TCSC untuk mengatur aliran daya aktif di semua saluran pada Sistem Tenaga Listrik Lampung khususnya saluran Bukit Kemuning – Baturaja.
2. Untuk penelitian selanjutnya dapat melakukan optimasi penempatan TCSC dengan software lain yang lebih akurat dalam penempatan posisi dan nilai TCSC.
3. Analisis pemasangan TCSC perlu memperhatikan atau memperhitungkan nilai arus yang mengalir pada saluran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Cekdin, Cekmas. 2007. *“Sistem Tenaga Listrik (Contoh Soal dan penyelesaiannya menggunakan MATLAB)”*. Yogyakarta : Andi Offset.
- [2] Roseno Makmur Muhammad. *“Studi Penentuan Margin Daya Reaktif Berkenaan dengan Gagal Tegangan Menggunakan Metode Optimasi Newton”* Tesis. Institut Teknologi Bandung. 1996
- [3] Naim Kurniawati. *“Aplikasi Peralatan Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) pada Sistem Tenaga Listrik”*. Universitas Hasanuddin. 2008
- [4] Hakim Efendi Lukmanul. *“Pemanfaatan Teknik Modulasi Lebar Pulsa (PWM) untuk Kompensasi Seri Terkendali”*. Tesis. ITB. Bandung 2006
- [5] Mohammad Hafidz. *“Kompensator Daya Reaktif”*. Sekolah Tinggi Teknik –PLN (STT-PLN)
- [6] Hastanto Ari, Yuningtyastuti, Handoko Susatyo. *“Optimasi Penempatan SVC untuk Memperbaiki Profil Tegangan Pada Sistem 500 KV Jamali Menggunakan Metode Particle Swarm Optimization (PSO)”*. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro.2012

- [7] Syukriyadin. "*Formulasi Optimal Power Flow dengan Konstrain Kestabilan Tegangan yang Melibatkan TCSC*". Volume 5. No1. Jurusan Teknik Elektro Universitas Syiah Kuala. 2006
- [8] Jumaat, S. A., dkk. 2012. *Optimal Placement and Sizing of Multiple FACTS Devices Installation*. IEEE International Conference on Power and Energy. Kota Kinabalu Sabah, Malaysia.
- [9] Saadat, H. 1999. *Power System Analysis*. McGraw-Hill: International Edition.
- [10] PT. PLN (Persero) Distribusi Lampung. "*Mengenal Sistem Kelistrikan*". <http://www.pln.co.id/lampung/?p=3551>. diakses pada tanggal 26 April 2016 pukul 21.52 WIB
- [11] Hillal, Hamzah. *Analisa Sistem Tenaga Listrik 1*. Pusat Pengembangan Bahan Ajar. UMB. Jakarta 2006