

**STUDI PENEMPATAN STATCOM PADA SISTEM TRANSMISI SULSELBAR
SETELAH MASUKNYA PLTB SIDRAP DAN JENEPONTO**



TUGAS AKHIR

Disusun Guna Memenuhi Persyaratan Untuk Meraih Gelar Strata 1 (S1)

Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik

Universitas Hasanuddin

Makassar

OLEH:

NURUL KHAERUNNISA HASMUDI

D411 16 513

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2020



LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**STUDI PENEMPATAN STATCOM PADA SISTEM TRANSMISI SULSELBAR
SETELAH MASUKNYA PLTB SIDRAP DAN JENEPONTO**

Disusun Oleh:

NURUL KHAERUNNISA HASMUDI

D411 16 513

Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Pernyataan untuk Menyelesaikan Program
Strata-1

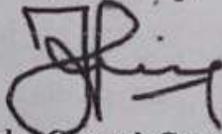
pada Sub-Program Teknik Energi.

Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Gowa, 07 Agustus 2020

Disahkan Oleh:

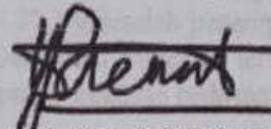
Pembimbing I



Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T.

NIP: 19731118 199803 2 001

Pembimbing II

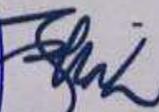


Ir. Hj. Zaenab Muslimin, M.T.

NIP: 19660201 199202 2 002

Mengetahui,

Prof. Baharuddin Hamzah, S.T., M.Arch., Ph.D



Prof. Baharuddin Hamzah, S.T., M.Arch., Ph.D

NIP: 195030819951210011



PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini, nama Nurul Khaerunnisa Hasmudi., dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul "Studi Penempatan Statcom Pada Sistem Transmisi Sulsebar Setelah Masuknya PLTB Sidrap Dan Jeneponto", adalah karya ilmiah penulis sendiri, dan belum pernah digunakan untuk mendapatkan gelar apapun dan dimanapun.

Karya ilmiah ini sepenuhnya milik penulis dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temua dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Makassar, 11 Agustus 2020

Yang membuat pernyataan,


Nurul Khaerunnisa Hasmudi
Nim: D411 16 513



ABSTRAK

Nurul Khaerunnisa Hasmudi., Studi Penempatan STATCOM Pada Sistem Transmisi Sulselbar Setelah Masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto (dibimbing oleh Indar Chaerah Gunadin dan Zaenab Muslimin)

Tenaga angin atau bayu yang digunakan PLTB memiliki kecepatan yang tidak selamanya konstan. Kemungkinan terjadinya fluktuasi kecepatan angin sangat tidak bisa dielakkan dan tidak boleh diremehkan. Hal tersebut tentunya akan mempengaruhi kestabilan sistem pada saat kedua PLTB yaitu PLTB Sidrap dan Jeneponto tersebut masuk ke sistem interkoneksi Sulselbar. Untuk menjaga agar tegangan pada sistem tetap normal, maka di butuhkan suatu peralatan untuk mengatasi jatuh tegangan yang terjadi pada sistem. Pada penelitian ini digunakan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) sebagai *volatage regulator*. STATCOM dapat menghasilkan daya reaktif dan menyerap daya reaktif sesuai dengan kebutuhan sistem. Adapun sistem yang digunakan adalah sistem transmisi sulselbar. *Software* yang digunakan untuk melakukan simulasi pemasangan STATCOM adalah PSAT 2.19 MATLAB 2014a dengan metode perhitungan aliran daya menggunakan metode Newton Raphson. Simulasi dilakukan dengan dua keadaan yang berbeda yaitu keadaan normal dan keadaan saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa sebelum dan setelah terintegrasi PLTB Sidrap dan Jeneponto. Hasil simulasi sistem dalam keadaan normal sebelum terintegrasi PLTB diperoleh bus 43 memiliki tegangan 249 kV setelah penempatan STATCOM naik menjadi 274 kV. Sedangkan ketika sistem mengalami gangguan tegangan pada bus 43 adalah 187 kV setelah penempatan STATCOM tegangan bus 43 adalah 273.62 kV. Hasil simulasi sistem dalam keadaan normal setelah terintegrasi PLTB diperoleh bus 43 memiliki tegangan 249.75 kV. Sedangkan ketika sistem mengalami gangguan tiga fasa tegangan pada bus 43 adalah 186.97 kV setelah penempatan STATCOM tegangan bus 43 adalah 271.39 kV. Dari hasil simulasi tersebut menunjukkan bahwa STATCOM dapat meningkatkan profil tegangan pada masing-masing bus.

Kata Kunci: kestabilan tegangan, STATCOM, sistem transmisi sulselbar, PLTB Sidrap dan Jeneponto, PSAT, MATLAB.



ABSTRACT

Nurul Khaerunnisa Hasmudi., Studi Penempatan STATCOM Pada Sistem Transmisi Sulsebar Setelah Masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto (dibimbing oleh Indar Chaerah Gunadin dan Zaenab Muslimin)

The wind or wind power used by the PLTB has a speed that is not always constant. The possibility of wind speed fluctuations is inevitable and should not be underestimated. This will affect the stability of the system when the two PLTBs, namely the Sidrap and Jeneponto PLTBs are logged into the interconnection system of Sulsebar. In order to keep the voltage in the system normal, equipment is needed to overcome the voltage drop that occurs in the system. In this study, the Static Synchronous Compensator (STATCOM) as the volatage regulator. STATCOM can generate reactive power and absorb reactive power according to system requirements. The system used is the Sulsebar transmission system. The software used to simulate the installation of STATCOM is PSAT 2.19 MATLAB 2014a with the power flow calculation method using the Newton Raphson method. The simulation was carried out in two different conditions, namely the normal state and the situation when there was a three-phase short circuit before and after the Sidrap and Jeneponto PLTB integration. The simulation results of the system in normal conditions before the PLTB integrated it obtained that bus 43 had a voltage of 249 KV, after the STATCOM placement increased to 274 kV. Meanwhile, when the system experiences a problem, the voltage on bus 43 is 187 KV, after placing STATCOM, the bus voltage of 43 is 273.62 kV. The simulation results of the system in a normal state after integrating PLTB obtained that bus 43 has a voltage of 249.75 kV. Meanwhile, when the system has a three-phase fault, the voltage on bus 43 is 186.97 kV after placing STATCOM, the voltage on bus 43 is 271.39 kV. The simulation results show that STATCOM can improve the voltage profile on each bus.

Keywords: voltage stability, STATCOM, sulsebar transmission system, PLTB Sidrap and Jeneponto, PSAT, MATLAB.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat serta kasih-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir berjudul : “Studi Penempatan STATCOM pada sistem transmisi sulselbar setelah masuknya PLTB Sidrap dan Jenepono”.

Tujuan penulisan tugas akhir ini untuk memenuhi sebahagian syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) bagi mahasiswa program S1 di program studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh sebab itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak demi kesempurnaan tugas akhir ini.

Terselesainya tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati dan penuh rasa hormat penulis menghaturkan terima kasih yang sebesar – besarnya bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan moril maupun materil baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan tugas akhir ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih yang tulus kepada:

1. Bapak Dr. Indar Chaereah Gunadin, S.T., M.T selaku pembimbing I dan Ibu Ir. Hj. Zaenab Muslimin, M.T. selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, gagasan, serta ide – ide dalam penyelesaian tugas akhir ini.

t. Ir. Yustinus Sombolayuk, MT dan Ir. Hj. Gassing, MT selaku dosen yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam



penyusunan tugas akhir ini.

3. Seluruh dosen pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan, kemudahan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Salama Manjang, M.T. selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. A. Muhammad Arsyad Thaha, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
6. Ibu Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, M.A. selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
7. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) Unit Induk Pembangkitan dan Penyaluran Wilayah Sulselrabar.
8. Kedua orang tua dan kakak saya yang sangat saya cintai, mereka yang tak putus – putusnya mendoakan, memberikan motivasi, dan pengorbanannya baik dari segi moril, maupun materi kepada saya sehingga saya dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
9. KI2A *Official* (Kiki, Alya dan Amel) teman seperjuangan yang sangat banyak membantu penulis, yang selalu baik, selalu menolong dan memberi solusi dan selalu ada saat suka maupun duka dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Teman – teman terdekat saya Dede, Nadya, dan Marjan, tersayang yang selalu bersedia mendengar curhat dan memberikan hiburan dan juga Jihan, Rany, Husnul yang selalu semangat saya selama ini.



teman Gangzta (Owen, Puput, Jijah, Debo, Adit, Dinda, Gita, dan Rahayu) selalu menghibur dan menyemangati diwaktu saya mengerjakan tugas akhir

ini.

12. M. Reza Al Hady Rais yang selalu memberi dukungan dan perhatian selama menyelesaikan tugas akhir ini.
13. Teman – teman Etarbiv (Kiki, Amel, Alya, Shania, Nita, Dhea, dan Firda) yang telah menemani dan menyemangati penulis sejak awal masa perkuliahan hingga saat ini.
14. *Official* SKJ (Kiki, Amel, Alya, Shania, Reyhan, Restu, Fauzan, Amin, Gafur, Ryan) dan Fikri atas kebersamaannya.
15. EXCITER 16 tanpa terkecuali yang tidak dapat disebutkan satu persatu atas segala kebersamaan, kerjasama dan motivasinya selama penulis menapak masa – masa perkuliahan hingga pada penyelesaian studi ini.
16. Teman – teman seperjuangan riset Laboratorium Relay dan Pengukuran, terima kasih kerjasamanya dalam setiap kegiatan Lab.
17. Teman – teman Asisten Laboratorium Fisika Dasar yang memberi pengalaman dan pengetahuan tambahan serta kebersamaannya selama ini.
18. Semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini namun tidak bisa disebutkan satu persatu pada kesempatan ini.

Akhir kata, penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini jauh dari kesempurnaan, akan tetapi sedikit harapan semoga tugas akhir ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Aamiin.

Makassar, Juli 2020



Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xivi
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	6
2.1.1 Sistem Pembangkit.....	7
2.1.2 Jaringan Transmisi	7
2.1.3 Jaringan Distribusi.....	7
2.1.4 Gardu Induk.....	8
2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	9
2.3 Upaya Menangani Masalah Kestabilan Tegangan	16
2.4 Flexible AC Transmission System (FACTS)	18



2.4 <i>Static Synchronous Compensator</i> (STATCOM).....	22
2.4.1 Komponen Utama STATCOM	26
2.4.1.1 Voltage Source Converter (VSC).....	26
2.4.1.2 Kopling Transformator	27
2.4.1.3 Pengontrol.....	27
2.4.1.4 Sumber Energi DC.....	28
2.5 MATLAB (<i>Matrix Laboratory</i>).....	29
2.5.1 PSAT (Power System Analysis Toolbox)	30
2.6 Penelitian – penelitian sebelumnya.....	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	34
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	34
3.2 Metode Pengambilan Data	34
3.3 Jenis Penelitian	35
3.4 Metode Analisis Data	36
3.5 Diagram Alir Penelitian.....	52
3.6 Data Sistem	53
3.8 Perencanaan Simulasi	64
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	66
4.1 Simulasi saat Kondisi Normal (PLTB Sidrap & Jenepono belum terintegrasi).....	66
4.1.1 Simulasi saat Kondisi Normal sebelum menggunakan STATCOM	66
4.1.2 Simulasi saat Kondisi Normal setelah menggunakan STATCOM	68
4.2 Simulasi saat terjadi gangguan (PLTB Sidrap & Jenepono belum terintegrasi).....	73
4.2.1 Simulasi saat terjadi gangguan sebelum penempatan STATCOM	73



4.2.2 Simulasi saat terjadi gangguan setelah penempatan STATCOM.	76
4.3 Simulasi saat Kondisi Normal (PLTB Sidrap & Jeneponto terintegrasi) dengan daya output bervariasi	78
4.3.1 Simulasi pada Kondisi Normal saat PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya ouput bervariasi.....	79
4.3.2 Simulasi pada Kondisi Normal saat PLTB Jeneponto terintegrasi dengan daya ouput bervariasi.....	83
4.4 Simulasi saat terjadi gangguan (PLTB Sidrap & Jeneponto terintegrasi) dengan daya output bervariasi	87
4.4.1 Simulasi saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output bervariasi	87
4.4.1.1 Daya output PLTB Sidrap 25% sebelum penempatan STATCOM.....	87
4.4.1.2 Daya output PLTB Sidrap 25% sesudah penempatan STATCOM.....	89
4.4.1.3 Daya output PLTB Sidrap 50% sebelum penempatan STATCOM.....	92
4.4.1.4 Daya output PLTB Sidrap 50% sesudah penempatan STATCOM.....	94
4.4.1.5 Daya output PLTB Sidrap 75% sebelum penempatan STATCOM.....	96
4.4.1.6 Daya output PLTB Sidrap 75% sesudah penempatan STATCOM.....	98
4.4.1.7 Daya output PLTB Sidrap 100% sebelum penempatan STATCOM.....	100
4.1.8 Daya output PLTB Sidrap 100% sesudah penempatan STATCOM.....	102

2 Simulasi saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto



terintegrasi dengan daya output bervariasi.....	104
4.4.2.1 Daya output PLTB Jeneponto 25% sebelum penempatan STATCOM.....	105
4.4.2.2 Daya output PLTB Jeneponto 25% sesudah penempatan STATCOM.....	107
4.4.2.3 Daya output PLTB Jeneponto 50% sebelum penempatan STATCOM.....	109
4.4.2.4 Daya output PLTB Jeneponto 50% sesudah penempatan STATCOM.....	111
4.4.2.5 Daya output PLTB Jeneponto 75% sebelum penempatan STATCOM.....	113
4.4.2.6 Daya output PLTB Jeneponto 75% sesudah penempatan STATCOM.....	115
4.4.2.7 Daya output PLTB Jeneponto 100% sebelum penempatan STATCOM.....	118
4.4.2.8 Daya output PLTB Jeneponto 100% sesudah penempatan STATCOM.....	120
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	123
5.1 Kesimpulan	123
5.2 Saran.....	124
DAFTAR PUSTAKA	128
LAMPIRAN.....	128



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik	6
Gambar 2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik [12].....	10
Gambar 2.3 Batas operasi dari saluran transmisi untuk berbagai level tegangan yang berbeda	20
Gambar 2.4 Prinsip kerja pada sistem STATCOM [8].	24
Gambar 2.5 Garis Beban Sistem.....	25
Gambar 2.6 Konverter Sumber Tegangan Tiga Fasa	26
Gambar 2.7 Sumber Energi DC.....	28
Gambar 2.8 GUI PSAT 2.19	30
Gambar 3.1 Contoh Aliran Daya 3 Bus.....	46
Gambar 3.2 Flowchart	52
Gambar 3.3 <i>Single Line Diagram</i> Kelistrikan Sistem Suselbar	63
Gambar 4.1 Perbandingan Tegangan sebelum pemasangan STATCOM dan setelah pemasangan STATCOM pada kondisi normal	72
Gambar 4.2 Perbandingan Tegangan sebelum pemasangan STATCOM dan setelah pemasangan STATCOM saat terjadi gangguan tiga fasa di bus 41	78
Gambar 4.3 Perbandingan tegangan pada kondisi normal saat PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output bervariasi.....	83
Gambar 4.4 Perbandingan tegangan pada kondisi normal saat PLTB Jeneponto si dengan daya output bervariasi.....	86



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter yang dikontrol dari tiap perangkat FACTS.....	21
Tabel 3.1 Parameter Bus.....	46
Tabel 3.2 Data Penomoran Bus Sistem Sulselbar	53
Tabel 3.3 Data Penomoran Generator Sistem Sulselbar	55
Tabel 3.4 Data Beban Trafo dan Pembangkitan Sistem Sulselbar.....	56
Tabel 3.5 Data Impedansi Saluran Transmisi Sistem Sulselbar.....	59
Tabel 4.1 Profil Tegangan Kondisi Normal	67
Tabel 4.2 Profil Tegangan Sebelum dan Sesudah Pemasangan STATCOM.....	70
Tabel 4.3 Profil Tegangan Saat Terjadi Gangguan Di Bus 41	74
Tabel 4.4 Profil Tegangan pada saat terjadi gangguan tiga fasa di bus 41 Sebelum dan Sesudah Pemasangan STATCOM.....	76
Tabel 4.5 Profil tegangan kondisi normal saat PLTB Sidrap terintegrasi.....	80
Tabel 4.6 Profil tegangan kondisi normal saat PLTB Jeneponto terintegrasi	83
Tabel 4.7 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output 25% sebelum penempatan STATCOM	88
Tabel 4.8 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output 25% sebelum dan sesudah penempatan STATCOM.....	90
Tabel 4.9 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output 50% sebelum penempatan STATCOM	92
Tabel 4.10 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output 50% sebelum dan sesudah penempatan STATCOM.....	94
Tabel 4.11 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi	



dengan daya output 75% sebelum penempatan STATCOM	96
Tabel 4.12 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output 75% sebelum dan sesudah penempatan STATCOM.....	98
Tabel 4.13 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output 100% sebelum penempatan STATCOM	101
Tabel 4.14 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Sidrap terintegrasi dengan daya output 100% sebelum dan sesudah penempatan STATCOM.....	103
Tabel 4.15 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto terintegrasi dengan daya output 25% sebelum penempatan STATCOM	105
Tabel 4.16 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto terintegrasi dengan daya output 25% sebelum dan sesudah penempatan STATCOM.....	107
Tabel 4.17 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto terintegrasi dengan daya output 50% sebelum penempatan STATCOM	109
Tabel 4.18 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto terintegrasi dengan daya output 50% sebelum dan sesudah penempatan STATCOM.....	111
Tabel 4.19 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto terintegrasi dengan daya output 75% sebelum penempatan STATCOM	114
Tabel 4.20 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto terintegrasi dengan daya output 75% sebelum dan sesudah penempatan	

STATCOM..... 116

Tabel 4.21 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto



terintegrasi dengan daya output 100% sebelum penempatan STATCOM 118

Tabel 4.22 Profil tegangan saat terjadi gangguan ketika PLTB Jeneponto

terintegrasi dengan daya output 100% sebelum dan sesudah penempatan

STATCOM..... 120



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik adalah kebutuhan umat manusia yang harus selalu dipenuhi. Ketergantungan akan energi listrik ini tidak lepas dari perkembangan zaman itu sendiri, dimana saat ini semua peralatan yang digunakan sudah menggunakan keadaan listrik yang handal merupakan hal yang selalu diharapkan oleh konsumen dan juga selalu diusahakan oleh pihak penyedia energi listrik itu sendiri dalam hal ini adalah PLN. Secara umum dapat dikatakan bahwa energi listrik merupakan salah satu prasyarat kehidupan manusia, dan perkembangan kehidupan manusia memerlukan tambahan penyediaan energi listrik. Kebutuhan energi meningkat secara bertahap, baik ditinjau dari kapasitasnya, kualitasnya maupun ditinjau dari tuntutan distribusinya. Konsumsi listrik Indonesia yang begitu besar akan menjadi masalah bila dalam penyediaannya tidak sejalan dengan kebutuhan pasokan energi listrik.

Energi listrik dunia saat ini sumbernya masih didominasi dari bahan bakar fosil. Khususnya yang ada di Indonesia pembangkit listrik dengan menggunakan energi air sebagai penggerak turbin telah lama digunakan, namun ini tidak cukup untuk melayani jutaan konsumen listrik, akhirnya untuk menutupi kekurangan pasokan energi listrik pemerintah maupun swasta membangun pembangkit listrik dengan menggunakan bahan bakar minyak dari fosil. Tetapi, hal ini mengakibatkan

dampak buruk bagi lingkungan dan ekonomi. Oleh sebab itu pemerintah, dan solusi apa yang harus dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut.



Energi listrik dengan menggunakan sumber energi yang dapat diperbaharui (terbarukan) menjadi satu-satunya solusi untuk hal ini.

Energi terbarukan berasal dari proses alami dan kemungkinan tidak akan pernah habis. Potensi untuk mengembangkan energi terbarukan di Indonesia sangatlah besar, salah satu upaya pemanfaatan energi terbarukan yang dilakukan yaitu pembangunan Pusat Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Sulawesi selatan yaitu di Kabupaten Sidrap dan Kabupaten Jeneponto. Pembangkit Listrik ini mengkonversi energi angin menjadi energi listrik dengan menggunakan turbin angin. Jenis pembangkit energi angin tergolong baru di Indonesia walaupun pembangkit energi angin sudah lama dimanfaatkan oleh Negara maju seperti Belanda, Inggris, Australia dan lain-lain.

Tenaga angin atau bayu yang digunakan PLTB memiliki kecepatan yang tidak selamanya konstan. Kemungkinan terjadinya fluktuasi kecepatan angin sangat tidak bisa dielakkan dan tidak boleh diremehkan. Hal tersebut tentunya akan mempengaruhi kestabilan sistem pada saat kedua PLTB yaitu PLTB Sidrap dan Jeneponto tersebut masuk ke sistem interkoneksi Sulselbar. Dan penyebab utama terjadinya ketidakstabilan adalah ketidakmampuan sistem tenaga untuk memenuhi permintaan daya aktif. Sedangkan beban sistem yang berupa daya aktif selalu berubah sepanjang waktu. Untuk mempertahankan tegangan dalam batas toleransi yang diperbolehkan, penyediaan daya aktif (pembangkit) harus selalu disesuaikan dengan beban daya aktif.

Untuk menjaga agar tegangan pada sistem tetap normal, maka di butuhkan alat untuk mengatasi jatuh tegangan yang terjadi pada sistem. Salah satu



cara untuk menjaga kestabilan dari sistem ialah dengan menambahkan peralatan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) pada sistem tenaga listrik.

Maka dari itu dilakukan sebuah penelitian yang berjudul “Studi Penempatan STATCOM pada sistem suselbar akibat masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto“. Dalam penelitian ini, akan disimulasikan mengenai pengaruh pemasangan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) pada sistem tenaga listrik suselbar untuk memperbaiki kestabilan tegangan akibat masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah yang menjadi kajian dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana kestabilan tegangan pada sistem suselbar sebelum dan sesudah penempatan STATCOM sebelum masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto ?
2. Bagaimana kestabilan tegangan pada sistem suselbar saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa sebelum dan sesudah penempatan STATCOM sebelum masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto ?
3. Bagaimana kestabilan tegangan pada sistem suselbar setelah masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto dengan daya output bervariasi ?
4. Bagaimana kestabilan tegangan pada sistem suselbar saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa sebelum dan sesudah penempatan STATCOM setelah masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto dengan daya output

ervariasi ?



1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah :

1. Menganalisis kestabilan tegangan pada sistem suselbar sebelum dan sesudah penempatan STATCOM sebelum masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto
2. Menganalisis kestabilan tegangan pada sistem suselbar saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa sebelum dan sesudah penempatan STATCOM sebelum masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto
3. Menganalisis kestabilan tegangan pada sistem suselbar masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto dengan daya output bervariasi
4. Menganalisis kestabilan tegangan pada sistem suselbar saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa sebelum dan sesudah penempatan STATCOM setelah masuknya PLTB Sidrap dan Jeneponto dengan daya output bervariasi

1.4 Batasan Masalah

Untuk mendapatkan hasil pembahasan yang terarah, maka penulis memberikan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem transmisi kelistrikan Suselbar.
2. PLTB yang diteliti hanya pada daya output yang dihasilkan.

Penelitian ini akan dilakukan analisis untuk memperbaiki kestabilan tegangan



4. Penentuan *weak bus* pada sistem dilakukan dengan menghitung aliran daya menggunakan metode *Newton-Raphson*
5. Penempatan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) pada simulasi dibatasi dengan jumlah 1 unit pada lokasi *weak bus* yang telah ditentukan.
6. Pembangkit yang digunakan diasumsikan berjalan normal dan juga diasumsikan terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa yang terletak pada Bus Palopo.
7. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *MATLAB 2014a PSAT 2.19*

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Secara akademis, diharapkan penelitian ini dapat bermanfaat bagi penambahan referensi yang berkaitan dengan STATCOM di Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.
2. Secara Praktis, penelitian ini diharapkan bermanfaat bagi pihak PT. PLN (Persero) UP2B Wilayah Sulselbar.

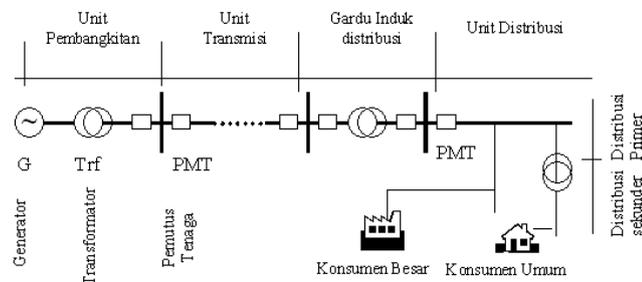


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik terdiri atas sistem pembangkitan, transmisi, dan distribusi. Secara umum rancangan (*lay out*) dari sistem tenaga listrik pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik

Sistem tenaga listrik pada Gambar 2.1 dilengkapi pula dengan gardu-gardu induk dan perangkat perlengkapan lainnya (instrumen ukur dan proteksi/pengaman), yang pada kenyataannya merupakan suatu sistem dan jaringan yang sangat kompleks [1].

Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Sistem tenaga listrik yang memiliki banyak mesin biasanya menyalurkan daya ke beban melalui saluran interkoneksi. Tujuan utama dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga

as dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang terus-menerus. Semakin berkembang sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan penurunan performansi sistem ketika mengalami gangguan. Salah satu efek



gangguan adalah osilasi elektromekanik yang jika tidak diredam dengan baik maka sistem akan terganggu dan dapat keluar dari area kestabilannya sehingga mengakibatkan pengaruh yang lebih buruk seperti pemadaman total (*blackout*) [1].

2.1.1 Sistem Pembangkit

Sistem pembangkit ini adalah sistem di mana energi listrik di-“proses” dan di-“hasil”kan, yang terdiri atas penggerak mula (prime mover), yang berupa perangkat mekanis untuk memutar kumparan generator dan generator itu sendiri. Sistem pembangkit ini terdiri atas bermacam-macam jenis dilihat dari beragam sudut pandang, misalnya dari segi keekonomisan, kontinuitas dan lain sebagainya [1].

2.1.2 Jaringan Transmisi

Pada umumnya sistem pembangkitan jauh dari tempat-tempat di mana energi listrik tersebut digunakan. Karenanya energi listrik yang dibangkitkan itu harus disalurkan melalui saluran transmisi. Karena tegangan generator umumnya rendah, antara 6 kV sampai 24 kV, maka tegangan tersebut harus dinaikkan oleh transformator daya yang ada (step up transformator) dengan pertimbangan ekonomis [1].

2.1.3 Jaringan Distribusi

Pada dasarnya jaringan distribusi mirip dengan jaringan transmisi, yaitu jaringan sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik melalui konduktor-konduktor (kawat), yang membedakan hanyalah bahwa jaringan

adalah jaringan transmisi energi listrik yang lebih ke hilir (konsumen), tegangannya telah diturunkan oleh transformator penurun tegangan hingga



mencapai tegangan menengah, pada jaringan transmisi tegangannya cenderung sangat tinggi sekali sampai batas-batas ekstrim (*extra high voltage*) [1].

2.1.4 Gardu Induk

Gardu Induk merupakan suatu tempat di mana sistem tenaga listrik dipusatkan untuk dikontrol dan disalurkan ke saluran transmisi berikutnya. Gardu induk (GI) dapat diklasifikasikan sebagai :

- a. Jenis pemasangan luar
- b. Jenis pemasangan dalam
- c. Jenis pemasangan setengah luar
- d. Jenis bawah tanah
- e. Jenis mobil dan lain sebagainya sesuai dengan konstruksinya.

GI jenis pemasangan luar terdiri dari peralatan tegangan tinggi pemasangan luar, misalnya transformator utama, saklar pindah-gerak (*switchgear*) dan peralatan control pemasangan-dalam, seperti panel saklar penghubung (*switchboard*) dan baterai.

Pada GI jenis pemasangan dalam, baik peralatan tegangan tinggi, peralatan penghubung, sampai system kontrolnya semua terpasang didalam ruangan. Biasanya GI jenis ini dipakai untuk menjaga keselarasan dengan daerah sekitarnya, serta untuk menghindari bahaya kebakaran dan gangguan suara.

Dalam GI jenis setengah pemasangan luar (*semi outdoor substation*), sebagian peralatan tegangan tingginya terpasang didalam GI. Sedangkan GI jenis pemasangan

nah, hamper semua peralatan terpasang dalam bangunan bawah tanah.

jenis mobil dilengkapi dengan peralatan di atas kereta (*trailer*) atau



semacam truck. GI jenis mobil ini dipakai dalam hal keadaan ada gangguan di suatu GI, guna pencegahan beban berlebih berkala dan guna pemakaian sementara ditempat pembangunan (untuk memenuhi kebutuhan dalam keadaan darurat) [1].

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Dalam pengoperasian sistem tenaga listrik pada setiap saat akan selalu terjadi perubahan kapasitas dan letak beban dalam sistem. Perubahan tersebut mengharuskan setiap pembangkit menyesuaikan daya keluarannya melalui kendali governor maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika hal ini tidak dilakukan maka akan menyebabkan keseimbangan daya dalam sistem terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun menyebabkan kinerja sistem memburuk. Kecepatan pembangkit memberi reaksi terhadap perubahan yang terjadi dalam sistem menjadi faktor penentu kestabilan sistem. Kestabilan mesin pembangkit sangat tergantung pada kemampuan sistem kendalinya. Sistem kendali yang andal jika mampu mengendalikan mesin tetap beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Jika semua mesin tetap beroperasi dalam kondisi normal meskipun ada gangguan, maka sistem tersebut akan benar-benar stabil [2].

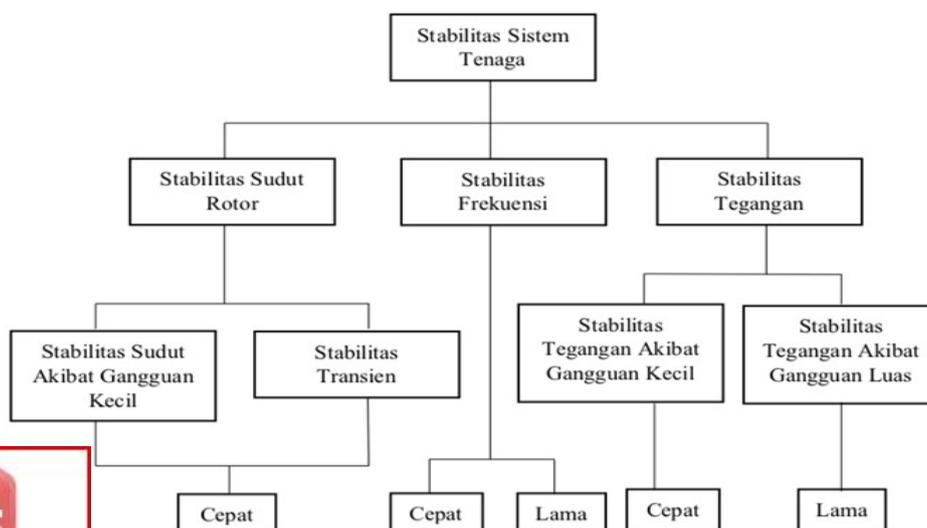
Kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan sebuah sistem tenaga listrik didalam mempertahankan kondisi normal dan mampu kembali

ke kondisi normal setelah terjadi gangguan [4]. Gangguan pada sistem tenaga listrik menjadi dua, yakni, gangguan kecil dan gangguan besar. Gangguan kecil



dalam bentuk perubahan beban yang terjadi secara kontinyu dan sistem menyesuaikan dengan perubahan kondisi. Sistem harus dapat beroperasi dibawah setiap kondisi secara memuaskan dan sesuai dengan permintaan beban. Selain itu, sistem juga harus dapat bertahan terhadap beberapa gangguan besar dari dalam dan luar sistem, termasuk hubung singkat pada saluran transmisi atau lepasnya sebuah pembangkit besar [12].

Respon sistem tenaga listrik terhadap gangguan dapat mempengaruhi kondisi peralatan. Sebagai contoh, sebuah gangguan pada elemen yang kritis dapat menyebabkan variasi pada aliran daya, tegangan bus jaringan, dan kecepatan rotor mesin. Variasi tegangan akan mengaktifkan exciter pada generator, variasi beban akan mengaktifkan governor untuk menyesuaikan kecepatan generator, serta variasi tegangan dan frekuensi akan mempengaruhi beban sistem menjadi bervariasi bergantung pada karakteristik masing-masing. Kestabilan tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam tiga bagian yang dapat dilihat pada Gambar 2.2 [12].



Gambar 2.2 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik [12]



Berdasarkan Gambar 2.2, kestabilan sistem tenaga listrik terbagi menjadi tiga kelompok :

a. Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor berhubungan dengan kemampuan suatu mesin yang terinterkoneksi dalam sebuah sistem tenaga listrik untuk tetap berada dalam keadaan sinkron setelah mengalami gangguan. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan kesetimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik masing-masing mesin sinkron dalam sistem. Ketidakstabilan dapat menyebabkan terjadinya kenaikan sudut ayunan beberapa generator menuju kehilangan sinkronisasinya dengan generator lain.

Salah satu faktor utama penyebab ketidakstabilan sudut rotor adalah variasi daya keluaran dari masing-masing mesin sinkron dapat menyebabkan sudut rotor berubah. Dalam kondisi mantap, keseimbangan antara masukan torsi mekanik dengan keluaran torsi elektromagnetik dari masing-masing mesin sinkron ini terpenuhi sehingga kecepatannya tetap konstan. Namun, jika sistemnya terganggu, maka mesin akan kehilangan keseimbangannya sehingga akan terjadi percepatan ataupun perlambatan dari rotor mesin. Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua kategori, yaitu kestabilan gangguan kecil (keadaan tunak) dan kestabilan pada keadaan transien.

b. Kestabilan Tegangan

Adapun kestabilan tegangan berhubungan dengan kemampuan suatu sistem

trik untuk mempertahankan tegangan tunak pada seluruh bus dalam sistem pada dibawah kondisi operasi normal setelah mengalami gangguan.



Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam bentuk kenaikan atau penurunan tegangan pada beberapa bus secara progresif. Akibat dari ketidakstabilan tegangan adalah lepasnya beban pada area dimana tegangan mencapai nilai rendah yang tidak dapat diterima. Faktor utama yang memengaruhi ketidakstabilan tegangan adalah jatuh tegangan yang terjadi ketika aliran daya aktif dan daya reaktif melalui reaktansi induktif jaringan transmisi.

Hal ini membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk menyalurkan daya. Transfer daya akan semakin terbatas ketika beberapa generator mencapai batas kemampuan daya reaktifnya. Kestabilan tegangan sangat terancam ketika kebutuhan akan daya reaktif melebihi kapasitas daya reaktif yang tersedia dari sumber. Kestabilan tegangan juga terbagi menjadi dua kategori, yaitu stabilitas tegangan gangguan besar dan stabilitas tegangan gangguan kecil. Rentang waktu untuk masalah stabilitas tegangan bervariasi dari beberapa detik hingga hitungan menit. Sehingga, stabilitas tegangan mungkin merupakan fenomena jangka panjang atau jangka pendek.

Berdasarkan rentang waktu terjadinya, kestabilan tegangan dibagi menjadi kestabilan tegangan transien (*transient voltage stability*) dan kestabilan tegangan jangka panjang (*long-term stability*). Masalah kestabilan tegangan biasanya terjadi pada sistem dengan pembebanan yang besar. Ketidakstabilan tegangan dapat menginisiasi terjadinya runtuh tegangan. Ketidakstabilan tegangan dan proses runtuh tegangan ini dapat terjadi dalam selang waktu beberapa detik hingga

menit. [11].

stabilan tegangan jangka pendek melibatkan komponen beban



berdinamika cepat seperti motor induksi, beban yang dikontrol secara elektronik, dll. Sementara kestabilan tegangan jangka panjang melibatkan peralatan dengan respon yang lebih lambat seperti perubahan tap transformator, kontrol beban termostatik, dan generator pembatas arus [12].

Adapun konsep dasar yang berhubungan dengan kestabilan tegangan yaitu [12]:

- a. Karakteristik sistem transmisi
- b. Karakteristik generator
- c. Karakteristik beban
- d. Karakteristik kompensator daya reaktif

Kestabilan tegangan berkaitan dengan daerah beban dan karakteristik beban. Kestabilan sudut rotor berkaitan dengan pembangkit listrik kecil yang terintegrasi dengan sebuah sistem besar melalui saluran transmisi yang panjang. Singkatnya, secara mendasar kestabilan tegangan merupakan kestabilan beban, sedangkan kestabilan sudut rotor merupakan kestabilan generator. Sehingga apabila terjadi runtuh tegangan (*voltage collapse*) pada sebuah sistem transmisi yang jauh dari beban, hal itu merupakan ketidakstabilan sudut rotor. Jika runtuh tegangan terjadi pada daerah beban, hal tersebut sebagian besar disebabkan oleh masalah ketidakstabilan tegangan.

c. Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi terkait dengan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik

mempertahankan frekuensi tunak dengan kisaran nominal mengikuti gangguan sistem yang menghasilkan ketidakseimbangan yang signifikan



antara pembangkitan dan beban. Hal ini bergantung pada kemampuan sistem untuk mengembalikan keseimbangan antara beban dengan pembangkitan dimana pelepasan atau kehilangan beban diminimalisir. Umumnya, masalah kestabilan frekuensi berhubungan dengan tidak memadainya respon peralatan, koordinasi yang buruk pada peralatan proteksi dan kendali, atau ketersediaan pembangkitan yang kurang [12].

Suatu sistem tenaga listrik dikatakan baik jika memenuhi beberapa syarat sebagai berikut [5].

1. Keandalan (*Reliability*) yaitu kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus-menerus.
2. Kualitas (*Quality*) yaitu kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. Kestabilan (*Stability*) yaitu kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan.

Gangguan pada suatu sistem yang disebabkan oleh pembebanan yang mendadak, timbulnya gangguan hubung singkat, hilangnya penguatan (*excitation*) dalam medan suatu generator, dan oleh karena pengalihan, dapat menyebabkan kehilangan keserempakan, meskipun bila perubahan dalam system yang disebabkan oleh gangguan itu tidak melebihi batas kestabilan jika perubahannya dilakukan secara bertahap. Nilai batas daya itu disebut batas kestabilan peralihan (*transient stability limit*) atau batas kestabilan keadaan mantap (*steady state stability limit*),

apakah titik letak stabilan itu dicapai oleh karena perubahan dalam atau terjadi secara tiba-tiba ataukah bertahap [3].



Meskipun kestabilan sebuah sistem dapat dilihat secara menyeluruh dan meluas, tetapi untuk analisis sebuah sistem, kestabilan sistem dapat dibagi menjadi tiga (3) kategori [13]:

1. Kestabilan mantap (*Steady State Stability*)

Kestabilan steady state adalah kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi sebelum terjadi gangguan setelah sistem mengalami gangguan kecil. Analisis kestabilan steady state pada sistem tenaga dapat disebut sebagai kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*). Kestabilan steady state merupakan sebuah fungsi dari kondisi operasi.

2. Kestabilan dinamik (*Dynamic Stability*)

Kestabilan dinamik adalah keadaan sebenarnya gangguan - gangguan (*disturbances*) pada sistem tenaga terjadi terus menerus karena beban itu sendiri berubah terus menerus dan juga karena perubahan perputaran turbin tetapi perubahan ini biasanya kecil, sehingga tidak sampai menyebabkan sistem kehilangan keserempakannya.

3. Kestabilan peralihan (*Transient Stability*)

Kestabilan peralihan adalah kemampuan sistem tenaga untuk mencapai kondisi stabil operasi baru yang dapat diterima setelah mengalami gangguan besar. Analisis kestabilan transient menggunakan pendekatan model non linier.

Kestabilan transient pada sistem tenaga adalah respon keluaran yang mencapai

si operasi steady state yang diizinkan dan sistem yang dapat kembali ke semula pada saat sistem mengalami gangguan. Kestabilan transient



merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan.

2.2.1 Upaya Menangani Masalah Kestabilan Tegangan

Beberapa metode dapat digunakan untuk mengurangi masalah kestabilan tegangan antara lain [10]:

a. Pembangkit yang harus beroperasi

Mengoperasikan generator cadangan (*back up supply*) untuk menyediakan dukungan tegangan selama keadaan darurat atau ketika saluran baru atau transformator terlambat beroperasi.

b. Kapasitor Seri

Penggunaan kapasitor seri bertujuan untuk seolah-olah memperpendek saluran listrik yang panjang yang berarti mengurangi rugi daya reaktif. Selain itu, saluran listrik tersebut dapat mengirim daya reaktif yang lebih banyak menuju daerah yang kekurangan suplai daya reaktif.

c. Kapasitor Paralel

Walaupun penggunaan kapasitor paralel yang banyak dapat menjadi bagian dari masalah kestabilan tegangan, terkadang kapasitor tambahan juga dapat menyelesaikan masalah dengan menggantikan fungsi cadangan daya reaktif berputar pada generator. Pada umumnya, hampir seluruh kebutuhan daya reaktif disuplai secara lokal, sedangkan generator hanya menyuplai daya aktif.

d. Kompensator Statis (SVC dan STATCOM)

mpensator statis, pasangan kondenser sinkron berdasarkan elektronika a, efektif dalam mengendalikan tegangan dan mencegah *voltage collapse*,



tetapi memiliki banyak keterbatasan yang harus diketahui. *Voltage collapse* yang terjadi pada sistem bergantung pada kompensator statis ketika sebuah gangguan yang melebihi kriteria perencanaan menyebabkan kompensator mencapai batasnya.

e. Operasi pada Tegangan yang Lebih Tinggi

Operasi pada tegangan yang lebih tinggi tidak meningkatkan cadangan daya reaktif, tetapi menurunkan permintaan daya reaktif. Sehingga dapat mempertahankan generator jauh dari batas daya reaktifnya dan hal tersebut membantu operator untuk menjaga kendali tegangan. Perbandingan dari kurva Q-V pada sisi penerima untuk dua sisi pengirim menunjukkan nilai tegangan yang lebih besar.

f. Pelepasan Beban *Undervoltage*

Sedikit pengurangan beban, walaupun sebesar 5% hingga 10% dapat membuat perbedaan yang signifikan antara collapse atau bertahan. Saat ini, pelepasan beban manual digunakan untuk tujuan ini (beberapa utility menggunakan pengurangan tegangan distribusi melalui SCADA), walaupun mungkin kurang efektif karena terlalu lambat jika terdapat kekurangan daya reaktif yang cukup besar. *Undervoltage rele invers time* jarang digunakan, tetapi dapat menjadi sangat efektif. Pada sebuah jaringan radial, pelepasan beban didasarkan pada tegangan sisi primer. Pada masalah kestabilan keadaan tunak, pelepasan beban pada sisi penerima akan lebih efektif walaupun

ngkin tegangan paling rendah berada didekat pusat beban.



g. Faktor Daya Generator yang Lebih Rendah

Ketika pembangkitan baru cukup dekat dengan daerah yang mungkin membutuhkan cadangan daya reaktif yang besar, faktor daya generator sebesar 0,8 atau 0,85 terkadang mungkin lebih sesuai. Akan tetapi, kapasitor dengan sebuah faktor daya generator yang tinggi dimana generator tersebut memiliki kemampuan beban lebih daya reaktif akan lebih fleksibel dan ekonomis.

h. Menggunakan Kemampuan Beban Lebih Daya Reaktif Generator

Generator harus digunakan seefektif mungkin. Kemampuan beban lebih dari generator dan eksiter dapat digunakan untuk menunda *voltage collapse* hingga operator dapat mengubah pengiriman atau membatasi beban ketika terjadi beban lebih (*overload*). Akan lebih baik jika kemampuan beban lebih didefinisikan lebih lanjut, operator dilatih untuk menggunakannya, dan divais proteksi diatur agar tidak mencegah penggunaannya.

2.3 Flexible AC Transmission System (FACTS)

Sistem penyaluran tenaga listrik dibagi menjadi dua bagian yaitu sistem transmisi dan sistem distribusi. Pada sistem transmisi saat ini, diketahui bahwa sistem transmisi listrik DC lebih efisien daripada transmisi tenaga listrik AC. Namun, pada kenyataannya terdapat lebih banyak saluran transmisi AC daripada transmisi listrik DC, hal ini disebabkan karena pembuatan saluran transmisi listrik

memerlukan biaya yang besar dan untuk mengubah dari saluran transmisi AC yang telah ada menjadi saluran transmisi listrik DC diperlukan waktu



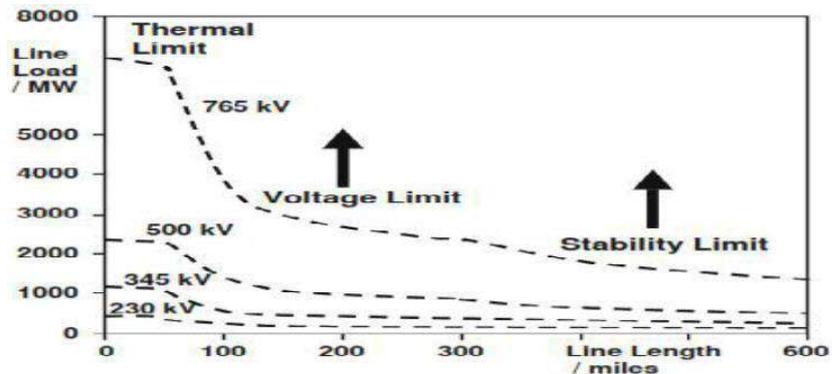
yang lama dan biaya yang besar, oleh karena itu pengembangan peralatan yang dapat memaksimalkan transmisi energi listrik AC menjadi solusi utama dalam penyaluran sistem tenaga listrik. Pengembangan *Flexible AC Transmission System* (FACTS) merupakan solusi yang dapat dipakai dalam memaksimalkan transmisi listrik AC. Penggunaan FACTS dalam saluran transmisi memiliki tujuan utama yaitu mengoperasikan saluran transmisi sampai batas termalnya. Tanpa FACTS, saluran masih tetap menyalurkan banyak energi listrik akan tetapi dengan suatu persentasi daya reaktif yang relatif besar. FACTS dapat meningkatkan stabilitas sistem, mengontrol tegangan dan redaman (*damping*) osilasi daya. Hal tersebut menjadi alasan utama mengapa sangat diperlukan mempelajari stabilitas sistem energi listrik dengan mempertimbangkan pemakaian FACTS pada saluran transmisi. Aplikasi dasar dari peralatan FACTS antara lain [14].

1. Kontrol aliran daya
2. Meningkatkan kemampuan transmisi
3. Kontrol tegangan
4. Kompensasi daya reaktif
5. Meningkatkan stabilitas
6. Meningkatkan kualitas daya
7. *Power conditioning*
8. *Mitigasi flicker*
9. Interkoneksi energi terbarukan



aruh peralatan FACTS dapat dicapai dengan mengatur kompensasi shunt
Dengan menggunakan komponen elektronika daya, maka reaksi kerja dari

FACTS diperoleh dalam waktu singkat yang kurang dari satu detik.



Gambar 2.3 Batas operasi dari saluran transmisi untuk berbagai level tegangan yang berbeda [15]

Batas operasi dari saluran transmisi menunjukkan kemampuan kerja saluran dalam sisten tenaga listrik. Berdasarkan Gambar 2.3 dapat dilihat hubungan antara beban saluran dan panjang saluran, batas *termal*, batas tegangan, dan batas stabilitas dari saluran. Semakin besar beban saluran dan semakin panjang saluran transmisi maka tingkat kestabilan transmisi akan menurun, semakin besar beban saluran dan semakin kecil panjang dari saluran maka batas termal saluran akan meningkat. Pada peralatan FACTS terdapat bentuk ‘dinamis’ dan ‘statis’ , dimana bentuk ‘dinamis’ pada FACTS digunakan untuk mengekspresikan kecepatan pengendalian peralatan FACTS yang diperoleh dari penggunaan komponen elektronika daya. Ini adalah salah satu factor utama yang membedakannya dari peralatan konvensional. Bentuk ‘statis’ berarti peralatan itu tidak mempunyai bagian yang bergerak seperti saklar mekanis untuk melakukan pengendalian dinamis. Oleh karena itu sebagian besar peralatan FACTS dapat berbentuk statis dan dinamis.



Flexible AC Transmission System (FACTS) merupakan suatu peralatan yang dapat meningkatkan kestabilan pada sistem tenaga listrik. Sistem Transmisi

AC Fleksibel (FACTS) didefinisikan oleh kelompok kerja IEEE sebagai: "Sistem transmisi arus bolak-balik menggabungkan daya berbasis elektronik dan pengendali statis lainnya untuk meningkatkan kemampuan kontrol dan meningkatkan kemampuan transfer daya" Arti penting dari elektronika daya dan Pengendali statis lainnya adalah mereka memiliki respons berkecepatan tinggi dan tidak ada batasan jumlah operasi. Pengontrol ini dapat mengalirkan tegangan secara dinamis, aliran daya aktif dan reaktif, dan impedansi saluran kontrol. Mereka dapat menyerap atau memasok daya reaktif dan penyimpanan mereka dapat memasok dan menyerap daya aktif juga[7].

Perangkat FACTS terdiri dari beberapa tipe, yaitu *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*, *Static Var Compensator (SVC)*, *Thyristor Controlled Breaking Reactor (TCR)*, *Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)*, *Static Synchronous Series Compensator (SSSC)*, *Interline Power Flow Controller (IPFC)*, *Thyristor Switched Series Reactor (TSSR)*, *Unified Power Flow Controller (UPFC)*, *Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC)*, *Interphase power controller (IPC)*, dapat dilihat pada Tabel 2.1 beberapa tipe FACTS serta parameter yang dikontrolnya [7].

Tabel 2.1 Parameter yang dikontrol dari tiap perangkat FACTS [7].

Perangkat FACTS	Parameter Kontrol
STATCOM	Pengatur tegangan, kompensasi VAR, <i>damping oscillation</i> , kestabilan tegangan
TCR,	Pengatur tegangan, kompensasi VAR, <i>damping oscillation</i> ,
TSR	kestabilan transient dan dinamik, kestabilan tegangan



Perangkat FACTS	Parameter Kontrol
TCBR	<i>Damping oscillation</i> , kestabilan transient dan dinamik
SSSC, TCSC, TSSC, TCSR, TSSR	Pengatur arus, <i>damping oscillation</i> , kestabilan transient dan dinamik, stabilitas tegangan, pembatas arus gangguan
TCPST	Pengatur daya aktif, <i>damping oscillation</i> , kestabilan transient dan dinamik, kestabilan tegangan
UPFC, GUPFC	Pengatur daya aktif dan reaktif, Pengatur tegangan, kompensasi VAR, <i>damping oscillation</i> , kestabilan tegangan, kestabilan transient dan dinamik, pembatas arus gangguan
IPFC	Pengatur daya reaktif, Pengatur tegangan, <i>damping oscillation</i> , kestabilan tegangan, kestabilan transient dan dinamik

2.4 Static Synchronous Compensator (STATCOM)

Unsur utama dari Sistem Tenaga AC adalah generator, transmisi (subtransmisi), jaringan distribusi, dan beban serta yang berhubungan dengannya peralatan pendukung dan peralatan proteksi. Generator merupakan mesin sinkron yang berputar, transmisi, subtransmisi dan jaringan transmisi pada dasarnya merupakan parameter distribusi, secara dominan adalah rangkaian reaktif yang dirancang untuk dioperasikan pada tegangan bolak-balik (*alternating voltage*)

menengah, dan rendah. Beban kemungkinannya sinkron, non-sinkron dan umumnya mengkonsumsi daya nyata dan reaktif. Pada pembahasan ini adalah ar transmisi ac yang ditetapkan dengan latar belakang teknik yang



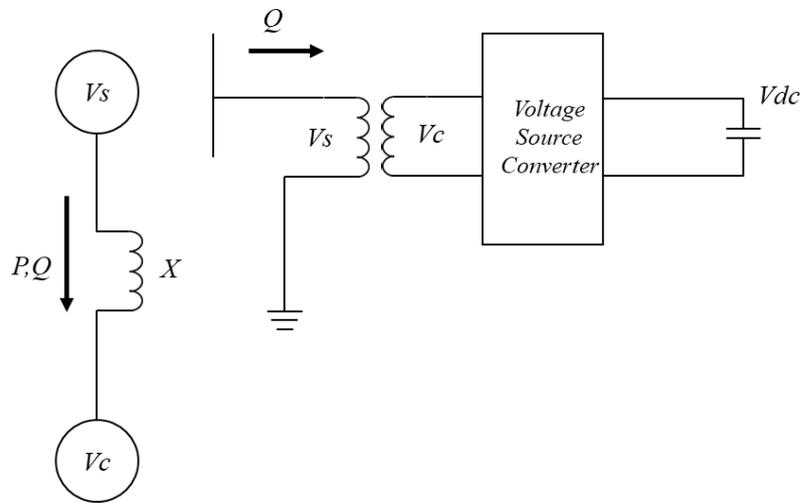
diperlukan untuk memahami permasalahan yang ditunjukkan pada sistem tenaga dan penyelesaiannya dengan dasar elektronika daya ditetapkan salah satunya adalah STATCOM, yang merupakan bagian dari jenis *Flexible AC Transmission System* (FACTS) [9].

STATCOM dikategorikan sebagai teknologi baru dalam bidang kompensator daya reaktif. STATCOM mampu menghasilkan nilai harmonik yang kecil dan nilai tegangan AC yang terkendali sebagai outputnya. Nilai-nilai tersebut dapat mempengaruhi nilai-nilai daya reaktif. Selain itu STATCOM juga mampu berfungsi untuk mengkompensasi beberapa masalah lain seperti flicker, impedansi hantaran pada sistem transmisi, dan perbedaan sudut fasa [8].

Kendali daya reaktif oleh STATCOM terjadi dengan cara membandingkan besarnya nilai tegangan terminal antara STATCOM dengan sistem. Apabila tegangan STATCOM bernilai lebih rendah maka STATCOM akan menyerap daya reaktif pada sistem. Apabila bernilai lebih tinggi dari sistem maka akan menghasilkan daya reaktif ke system [8].

Prinsip kerja dari STATCOM ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan dijelaskan pada persamaan (1), (2), dan (3) yang menunjukkan pengiriman daya aktif dan reaktif antara V_s Grid dan V_c STATCOM [8].





Gambar 2.4 Prinsip kerja pada sistem STATCOM [8].

$$P = \frac{V_S V_C \sin \delta}{X_L} \dots \dots \dots (1)$$

$$Q = \frac{V_S (V_S - V_C) \sin \delta}{X_L} \dots \dots \dots (2)$$

$$S = 3 \frac{V_S V_C}{X_L} \sin \delta - j3 \left(\frac{V_S V_C}{X_L} \cos \delta - \frac{V_S^2}{X_L} \right) = P - jQ \dots \dots \dots (3)$$

Sumber : Zainuddin (2015)

Ket :

S = Daya kompleks (VA),

V_C = Tegangan terminal Statcom,

V_S = Tegangan dari Grid/Sistem,

P = Daya aktif (W)

X_L = Reaktansi

Q = Daya reaktif (Var),

δ = Beda fasa antara V_S dan V_C

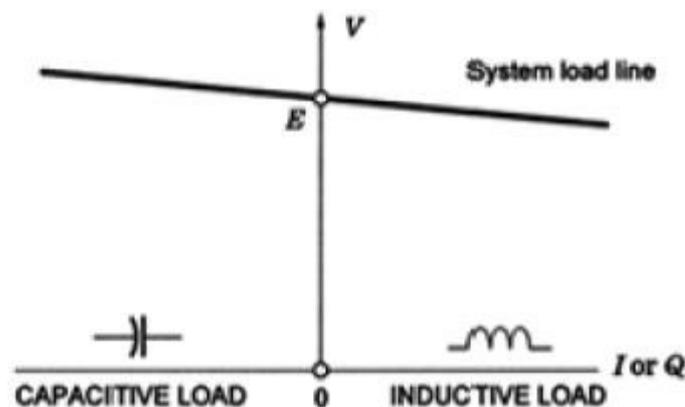


ti persamaan diatas dijelaskan bahwa variasi akan mempengaruhi aliran f antara sistem dengan STATCOM. Besarnya nilai *lagging*, maka daya

aktif akan mengalir dari STATCOM ke *grid*. Saat nilai *leading* maka daya aktif akan terserap ke STATCOM. Pada kondisi *grid* memiliki fasa yang sama dengan STATCOM, maka daya aktif akan bernilai nol ($P = 0$). Nilai = 0, didapatkan saat sistem dalam kondisi *steady state* [8].

Aliran daya aktif akan mencapai maksimum ketika sudut fasa adalah 90° . Dalam prakteknya, faktor daya harus diatas 0.85 s.d 0.9 sehingga sudut daya nilainya kecil (sekitar 25°). Hal ini ditujukan untuk menjaga sistem stabil dari transien dan osilasi dinamis. Oleh karena itu, sudut daya berpengaruh langsung terhadap aliran daya aktif (persamaan 1) sedangkan aliran daya reaktif dipengaruhi oleh perubahan tegangan antar bus, karena $\cos \delta$ mendekati 1 (persamaan 2).

Pada kondisi belum ada kompensasi maka tipikal saluran transmisi adalah beban induktif dimana arus tertinggal (*lagging*) terhadap tegangannya. Garis beban sistem digambarkan seperti Gambar 2.5 apabila beban sistem semakin induktif maka arus semakin tertinggal sedangkan Q juga semakin besar artinya semakin menyerap daya reaktif, sebaliknya apabila semakin kapasitif maka arus mendahului (*leading*) terhadap tegangan V dan menyuplai daya reaktif Q.



Gambar 2.5 Garis Beban Sistem



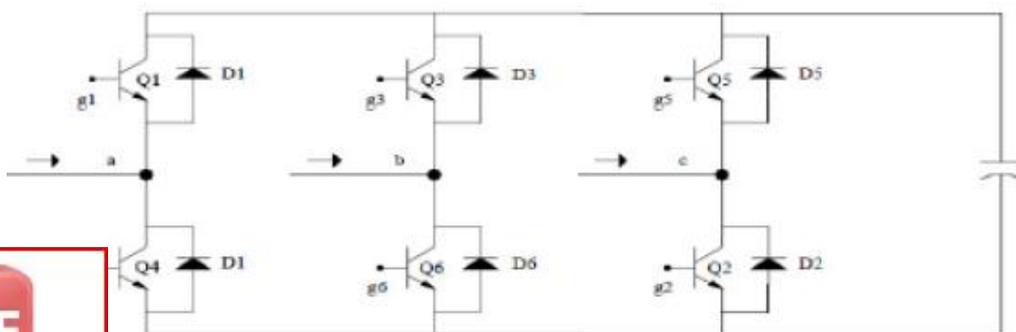
2.4.1 Komponen Utama STATCOM

STATCOM pada dasarnya terdiri dari empat komponen utama, yaitu :

1. *Voltage Source Converter* (VSC)
2. Kopling Transformator
3. Pengontrol
4. Penyimpanan energi DC

2.4.1.1 Voltage Source Converter (VSC)

VSC merupakan suatu piranti elektronika daya yang mampu menghasilkan tegangan sinusoidal dengan frekuensi, besar dan sudut fasa sesuai yang diinginkan. Dengan mengubah tegangan DC pada perangkat penyimpanan ke dalam satu set tiga fasa keluaran tegangan AC. Tegangan berada dalam fasa dan digabungkan dengan sistem AC melalui reaktansi transformator kopling. Fungsi VSC sebagai rectifier saat STATCOM menyerap daya reaktif dari sistem dan inverter saat STATCOM menyuplai daya reaktif ke sistem. Tegangan yang hilang dalam hal ini adalah perbedaan antara tegangan nominal dan aktual. VSC biasanya didasarkan pada beberapa jenis penyimpanan energi yang akan memasok tegangan DC dan tegangan yang diinginkan kemudian diperoleh dengan mengalihkan perangkat elektronik *solid-state* di sirkuit *converter* [16].



Gambar 2.6 Konverter Sumber Tegangan Tiga Fasa



2.4.1.2 Kopling Transformator

Kopling Transformator dibutuhkan untuk menurunkan tegangan sistem agar sesuai dengan jaringan *utilitas*. Sebuah reaktor kopling biasanya digabungkan agar dapat menyaring komponen arus harmonisa yang dihasilkan oleh lonjakan tegangan output dari VSC. Perbedaan reaktansi kebocoran tegangan AC menghasilkan pertukaran daya rekatif antara STATCOM dan pada sistem tenaga listrik, dengan demikian bahwa tegangan AC di bus bar dapat diatur untuk meningkatkan profil tegangan dari sistem tenaga, yang merupakan tugas utama dari STATCOM. Atau, fungsi redaman sekunder dapat ditambahkan ke dalam STATCOM untuk meningkatkan stabilitas osilasi sistem tenaga. [16]

2.4.1.3 Pengontrol

Pengontrol melakukan kontrol umpan balik dan output dalam satu set tegangan yang mempengaruhi sinyal untuk menggerakkan saklar utama semikonduktor dari konverter daya. Hal ini membangkitkan pengalihan sinyal pada STATCOM yang digunakan untuk mengaktifkan STATCOM dalam menginjeksikan arus reaktif ke *grid* untuk bertindak sebagai *over-excited* generator sinkron (atau kapasitor) sehingga menaikkan tegangan *grid* atau menyerap reaktif saat ini dan berperilaku seperti generator sinkron *under-excited* (atau inductor) yang cenderung menurunkan tegangan *grid*. [16]

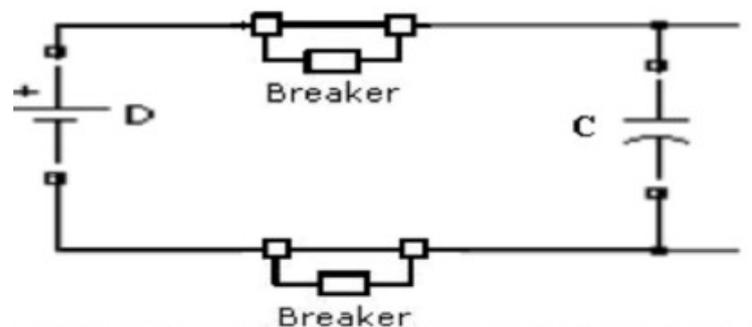
Fungsi utama dari pengontrol adalah menjaga tegangan agar besarnya konstan pada titik dimana beban sensitive terhubung dibawah gangguan sistem. Hal ini dilakukan dengan mengukur dan membandingkan tegangan r.m.s pada titik tegangan referensi. Perbedaan antara dua nilai adalah sinyal error fungsi sebagai *input* ke pengontrol. *Output* adalah sudut daya yang



disediakan untuk generator sinyal PWM. Dengan demikian, sinyal error diproses menghasilkan sudut daya yang diinginkan, yang akan mengarahkan kesalahan nol, sehingga memulihkan nilai r.m.s dari tegangan beban dengan nilai tegangan referensi.[16]

2.4.1.4 Sumber Energi DC

Sumber tegangan DC dapat disediakan oleh kapasitor yang terhubung di sisi DC dari VSC. Sumber energi DC terhubung secara paralel dengan kapasitor DC. Ini membawa masukan arus *ripple* dari konverter. Kapasitor dapat diisi oleh VSC. Fungsi VSC adalah untuk mendukung sumber daya nyata di bawah kondisi daya yang berfluktuasi. Dengan demikian, agar dapat mencapai pengaturan tegangan yang diperlukan, VSC terhubung secara paralel dengan kapasitor DC dari STATCOM sehingga menjadikannya sebagai elemen penyimpanan energi. VSC kemudian akan menyuntikkan atau menyerap daya reaktif yang diperlukan untuk menstabilkan sistem *grid* dengan tetap mempertahankan kapasitor DC dalam tegangan konstan. Dengan kata lain, mengisi daya dan melepaskan daya untuk memperbaiki profil tegangan. Dengan demikian, penyimpan energi DC bertanggung jawab untuk menyediakan dan menyerap daya nyata yang sedang ditukarkan oleh sistem transmisi di terminal DC-nya.[16]



Gambar 2.7 Sumber Energi DC



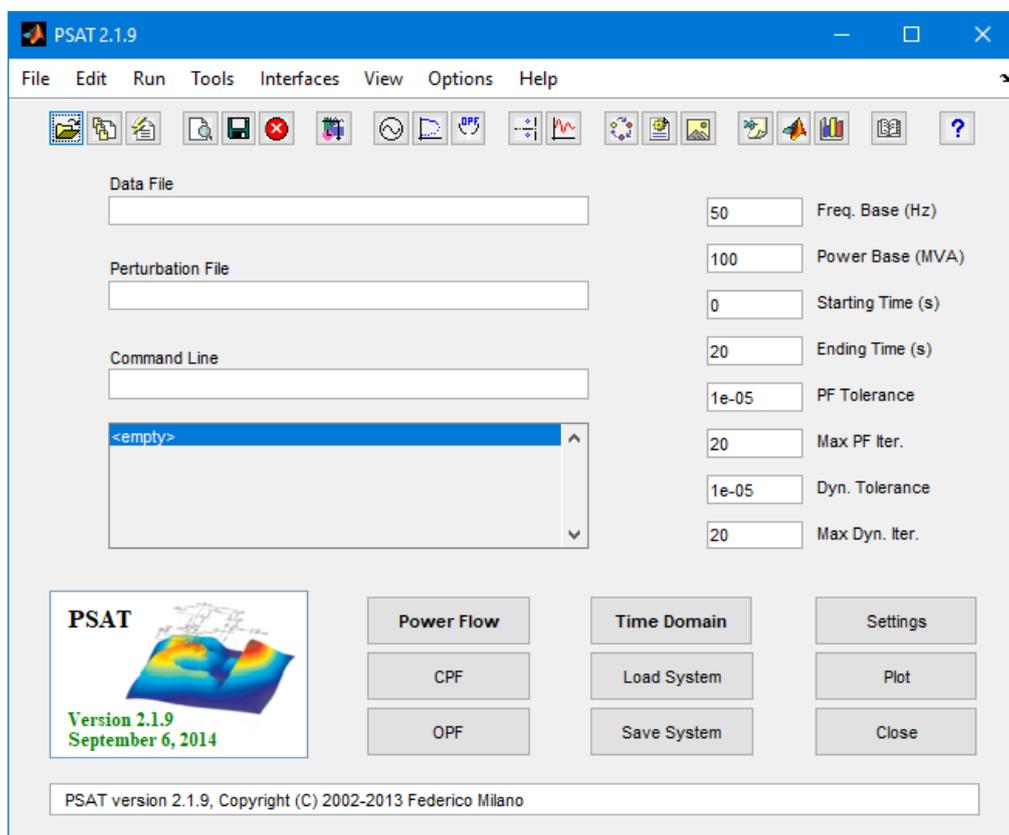
2.5 MATLAB (*Matrix Laboratory*)

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah suatu program untuk analisis dan komputasi numeric dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. Pada awalnya, program ini merupakan interface untuk koleksi rutin-rutin numeric dari proyek LINPACK dan EISPACK, dan dikembangkan menggunakan bahasa FORTRAN namun sekarang merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks, Inc. yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan menggunakan bahasa C++ dan assembler (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar MATLAB). MATLAB merupakan merk software yang dikembangkan oleh Mathworks, Inc. merupakan software yang paling efisien untuk perhitungan numeric berbasis matriks. Dengan demikian jika di dalam perhitungan kita dapat memformulasikan masalah ke dalam format matriks maka MATLAB yang merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi berbasis pada matriks sering digunakan untuk teknik komputasi numeric, untuk menyelesaikan masalah-masalah yang melibatkan operasi matematika elemen, matrik, optimasi, aproksimasi dan lain-lain. Sehingga MATLAB banyak digunakan pada : (1) Matematika dan Komputansi, (2) Pengembangan dan Algoritma, (3) Pemrograman modeling, simulasi, dan pembuatan prototype, (4) Analisa Data, eksplorasi dan visualisasi, (5) Analisis numeric dan statistic, dan (6) Pengembangan aplikasi teknik.



2.5.1 PSAT (Power System Analysis Toolbox)

PSAT adalah *toolbox* matlab yang digunakan untuk menganalisis dan mengendalikan sistem tenaga listrik. PSAT sudah digunakan dari 50 negara di dunia. Untuk menampilkan PSAT di matlab, user hanya mengetikkan 'psat' pada command window di matlab dan akan muncul tampilan *Graphical User Guide* GUI seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 GUI PSAT 2.19



2.6 Penelitian – penelitian sebelumnya

Dalam penelitian ini sumber referensi dan metode perhitungan yang digunakan juga didasarkan pada penelitian-penelitian sebelumnya, hal ini dilakukan untuk mendukung akurasi penelitian. Berikut skripsi dan jurnal ilmiah yang mendukung akurasi penelitian ini:

1. Zulfatri Aini dengan judul jurnal “Analisis Kestabilan Tegangan dengan Menggunakan *Static Synchronous Compensator* (STATCOM)”. Studi analisis ini mengkaji tentang bagaimana tersedianya daya reaktif yang dapat mengurangi rugi-rugi daya aktif sehingga kestabilan tegangan pada jaringan transmisi listrik terjaga dengan menggunakan STATCOM yang merupakan pembangkit *Volt Amp Reactive* (VAR) statis sehingga tegangan terpenuhi sesuai permintaan beban. Analisis data ini dilakukan dengan cara pengumpulan data yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) Sumbar-Riau dan simulasinya menggunakan *software* MATLAB (PSAT). Hasil analisis ini melihat perbandingan kestabilan tegangan pada sistem dengan atau tanpa STATCOM, yang dimana peralatan STATCOM dapat memperbaiki drop tegangan dan aliran daya dengan mengatur arus reaktif yang mengalir pada sisten dan terjadinya penurunan rugi-rugi daya reaktif sebesar 1% setelah pemasangan STATCOM dimana rugi-rugi daya reaktif sebelum pemasangan STATCOM yaitu 0.83 pu dan setelah pemasangan STATCOM turun menjadi 0.70 pu.

Fuad Ditya dan Awan Uji Krismanto dengan judul jurnal “Impelementasi



STATCOM untuk Meningkatkan Kestabilan Tegangan pada Sistem 150 kV PT. PLN SULSELBAR (Sulawesi Selatan dan Barat). Studi penelitian ini mengkaji tentang kestabilan tegangan pada sistem 150 kV ketika terjadi penambahan beban besar serta terjadi gangguan gangguan yang mempengaruhi kondisi kestabilan tegangan tersebut. Dimana untuk mengatasi kestabilan tegangan akibat perubahan titik operasi dan gangguan gangguan di sistem perlu adanya peralatan kompensator dimana pada penelitian ini menggunakan dua peralatan yaitu Kapasitor dan STATCOM. Analisa data ini dilakukan dengan cara pengumpulan data yang diperoleh dari PT. PLN Sulselbar (Sulawesi Selatan dan Barat) dan simulasi *load flow* menggunakan *software DIgSILENT Power Factory 15.1.0*. Hasil penelitian ini melihat kestabilan tegangan pada sistem dengan menggunakan Kapasitor dan STATCOM, dimana analisis dinamik pada bus yang telah dipasangkan STATCOM pada sistem, sistem mampu kembali ke keadaan *steady state* lebih cepat saat terjadi *3 phase short circuit* dan penambahan beban di bandingkan dengan pemasangan Kapasitor. Serta total *losses power* pada *losses base case* yaitu 22.77 MW dan 92.44 MVAR dan lebih baik saat penambahan kompensasi daya reaktif oleh Kapasitor dan STATCOM yaitu *losses* Kapasitor 50.39 MVAR serta *losses* STATCOM 50.36 MVAR dapat disimpulkan bahwa rugi-rugi daya saat menggunakan STATCOM lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan Kapasitor.

Alfian Sakti Pamungkas dengan judul skripsi “Optimasi Penempatan dan



Kapasitas STATCOM pada Sistem Tenaga Listrik Jamali 500 kV menggunakan *Metode Bacterial Foraging Optimization (BFO)*” studi penelitian ini mengkaji tentang optimasi penempatan STATCOM dan kapasitas STATCOM untuk memperbaiki profil tegangan dan menurunkan rugi-rugi daya, dimana hasil penelitian ini membandingkan juga hasil dari STATCOM dan Kapasitor. Analisis data ini dilakukan dengan cara pengumpulan data yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (P3B) dan simulasinya menggunakan software MATLAB dimana menggunakan metode BFO untuk optimasi penempatan STATCOM dan kapasitas yang optimal, BFO memiliki 4 proses dalam mencari solusi yang optimal yaitu melalui proses *Chemotaxis, Swarming, Reproduction dan Elimination and Dispersal*. Hasil yang diperoleh dari simulasi pada sistem transmisi jamali 500 kV menunjukkan bahwa solusi penempatan dan penentuan kapasitas STATCOM yang dioptimasi oleh BFO dapat memperbaiki profil tegangan dan menurunkan rugi-rugi daya yang lebih efektif daripada penempatan Kapasitor Bank. Hasil dengan penempatan STATCOM menunjukkan rugi daya reaktif turun menjadi 1426.803 MVAR dari 1480.189 MVAR atau turun sebesar 53.386 MVAR (3.742%) dan penempatan kapasitor bank turun menjadi 1427.549 MVAR atau turun sebesar 52.640 MVAR (3.556 %) dengan tetap menjaga nilai tegangan pada batas tegangan yang diijinkan.

