

SKRIPSI

**PERENCANAAN PENEMPATAN *STATIC VAR COMPENSATOR* UNTUK
MENINGKATKAN KESTABILAN TEGANGAN PADA SISTEM TENAGA
LISTRIK DENGAN PLTB**

Disusun Dan Diajukan Oleh :

ITA INDAH

D041 17 1004



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

**PERENCANAAN PENEMPATAN *STATIC VAR COMPENSATOR* UNTUK
MENINGKATKAN KESTABILAN TEGANGAN PADA SISTEM TENAGA
LISTRIK DENGAN PLTB**

Disusun dan diajukan oleh :

ITA INDAH

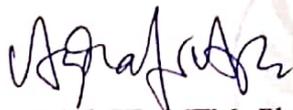
D041 17 1004

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada Tanggal 1 Desember 2021 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama

Pembimbing Pendamping



Ir. Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D.
NIP. 19780424 2001 12 2 001



Ir. M. Bachtiar Nappu, ST., MT., M.Phil., Ph.D
NIP. 19760406 2003 12 1 002

Ketua Program Studi



Dr. Eng. Ir. Dewiani, MT.
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Ita Indah
NIM : D041171004
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : SI

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“PERENCANAAN PENEMPATAN *STATIC VAR COMPENSATOR* UNTUK
MENINGKATKAN KESTABILAN TEGANGAN PADA SISTEM TENAGA
LISTRIK DENGAN PLTB”

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri dan semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitnya.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini hasil karya orang lain, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Makassar, 01 Desember 2021

Yang membuat pernyataan



Ita Indah

ABSTRAK

Kebutuhan tenaga listrik terus meningkat seiring pertumbuhan masyarakat. Sehingga menuntut produsen tenaga listrik untuk meningkatkan kualitas dan kuantitas tenaga listrik yang diproduksinya. Peningkatan beban pada sistem tenaga listrik dapat menimbulkan jatuh tegangan dan nilai rugi daya yang besar. Ketika PLTB terintegrasi ke sistem maka akan mempengaruhi kestabilan tegangan karena output yang dihasilkan oleh PLTB bergantung pada kekuatan angin, sehingga tidak selalu konstan atau bervariasi. Injeksi daya reaktif menggunakan *Static Var Compensator* (SVC) merupakan salah satu upaya untuk mengatasi permasalahan rugi-rugi daya transmisi dan penurunan tegangan akibat penambahan beban listrik. *Static Var Compensator* (SVC) merupakan salah satu perangkat FACTS yang berfungsi menyerap atau menginjeksikan daya reaktif untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya transmisi pada sistem. Adapun sistem yang digunakan adalah sistem IEEE 14 Bus. Metode perhitungan aliran daya menggunakan metode Newton Raphson. Simulasi dilakukan dengan tiga keadaan yang berbeda yaitu ketika normal, keadaan lepas generator dan keadaan saat terjadi kenaikan beban sebelum dan setelah terintegrasi PLTB. Kapasitas SVC yang digunakan pada simulasi adalah 0-20 MVar. Hasil simulasi sistem saat kondisi normal sebelum terintegrasi PLTB, saat kondisi normal (terintegrasi PLTB) dengan daya output PLTB bervariasi, saat lepas generator dan saat kenaikan beban dengan daya output PLTB bervariasi menunjukkan beberapa bus mengalami drop tegangan dan rugi-rugi daya yang besar. Setelah dilakukan penempatan SVC pada bus yang mengalami drop tegangan diperoleh seluruh bus dalam keadaan stabil atau berada pada standar tegangan IEEE dengan batas toleransi 0,95 p.u. sampai 1,05 p.u. dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem. Berdasarkan hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa penempatan SVC mampu memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya transmisi pada sistem.

Kata Kunci : Kestabilan tegangan, Rugi-rugi daya transmisi, SVC

ABSTRACT

Electricity demand is increasing as the population grows. Because of it, the electric power producer are prosecuted to improve electric power quality. Load increase of the power system could cause the voltage drop and power system losses. When the PLTB is integrated into the system it will affect voltage stability because the output generated by the PLTB is dependent on the power of the wind, so it is not always constant or intermittent. Injection the reactive power using static var compensator (SVC) is one of the attempts to confront the problems of transmission line losses and the voltage drop from increased load. *Static Var Compensator* (SVC) which is one of FACTS devices that function to absorb or inject the reactive power for voltage profile improvement and decrease transmission line losses in transmission system. The system used is the IEEE 14 bus system. Power flow calculation method using the Newton Raphson method. The simulation was carried out in three different conditions, namely the normal state, release of generator and load increment before and after the PLTB integration. The SVC capacity used in the simulation is 0-20 MVar. The simulation results of the system in normal conditions before the PLTB integrated, normal conditions after the PLTB integrated with varying power of PLTB output, release of generator and load increment with PLTB output varies show several bus experience a voltage drop and high power system losses. After placement of SVC on bus experience a voltage drop, the whole bus is either stable or at IEEE standards, with a tolerance limit of 0,95 p.u. to 1,050 p.u. and decrease transmission lines losses on the system. Based on the results of the simulation, it could be concluded that placement of SVC was able to improve voltage profile and decrease transmission lines losses on the system.

Keywords: Voltage Stability, Transmission line losses, SVC

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala, atas limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, demikian pula Shalawat bagi junjungan Rasulullah Muhammad SAW, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Perencanaan Penempatan *Static Var Compensator* Untuk Meningkatkan Kestabilan Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik Dengan PLTB”.

Tujuan penulisan skripsi ini untuk memenuhi sebagian syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) bagi mahasiswa program S1 di program studi Teknik Elektro Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa dalam menyelesaikan skripsi ini tidak mudah, banyak kendala yang dihadapi. Namun berkat bimbingan dan pertolongan dari Allah subhanahu wa ta'ala melalui bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

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 material baik langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan skripsi ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Abd. Rauf dan Ibunda Itte, Kakak Ahmad Afandi Rauf, Adik Tri Ita Putri beserta keluarga tercinta yang tidak henti-hentinya memberikan doa dan dukungan dalam bentuk apapun kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

2. Ibu **Ardiaty Arief, ST., MTM., Ph.D** selaku Pembimbing I dan Bapak **Ir. Muh. Bachtiar Nappu, ST., MT., M.Phil., Ph.D** selaku Pembimbing II, terima kasih telah meluangkan waktu dan memberikan bimbingan, gagasan, serta ide-ide dalam penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak **Prof. Dr. Ir. H. Nadjamuddin Harun., MS** dan Ibu **Dr.Ir. Hj. Sri Mawar Said, M.T** selaku dosen penguji yang selalu memberikan saran, koreksi, dan arahan demi sempurnanya skripsi ini.
4. Ibu **Dr.Eng. Dewiani, S.T., M.T** dan Bapak **Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T.** selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
5. Bapak **Prof. Dr. Ir. 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 dosen dan staf pengajar yang telah memberikan kami ilmu, bantuan, dan kemudahan selama kami menempuh pendidikan di Departemen Teknik Elektro.
8. Kepada Rekan-Rekan **“EQUAL17ER 2017”** Departemen Teknik Elektro angkatan 2017 yang sejak pertama menginjakkan kaki di Universitas Hasanuddin hingga saat ini berjuang bersama peneliti untuk menuntut ilmu di kampus merah tercinta.
9. Teman-teman Lab. Research Group Power and Energy Systems dan Lab. Research Group Power Systems and Electricity Market (Algazali, Hasriadi,

Yung, Tika, dan Sidiq) yang selalu memberikan dorongan dan motivasi dalam mengerjakan skripsi.

10. Sahabat Kerang Ajaib (Agung, Adi, Sidiq, Algazali, Ardi, Reski, Khusnul dan Tika) yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam mengerjakan skripsi.
11. Kanda-kanda Senior Industri 2016 (Kak Dani dan Kak Yans) selaku tim PKM KC 2019 yang membantu dan memberi pengalaman kepada saya selama mengikuti event tersebut.
12. Kanda-kanda Senior (Kak Ummu Khalsum, Kak Ayu Faradillah dan Kak A. Anugrah Paranrengi) yang telah memberikan ilmunya kepada penulis.
13. Sahabat Pergogol FC (Sabe, Ikhwal, Arif, Aji, Alif dan Dewi) yang selalu memberikan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi.
14. Teman-teman lama penulis (Neko, Ungu, Afif, Wisnu, Angga, Agil dan Jojo) yang selalu mendengar keluh kesah penulis.
15. Semua pihak yang terlibat dan tidak dapat saya sebut satu persatu, terima kasih yang tak terhingga atas semua dukungan dan bantuannya.

Akhir kata, penulis ucapkan *jazaakumullahu khairan* kepada seluruh pihak. Penulis menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini dikarenakan keterbatasan ilmu pengetahuan, wawasan, dan pengalaman.

Makassar, 01 Desember 2021

Ita Indah

viii

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----|
| LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR | ii |
| PERNYATAAN KEASLIAN | iii |
| ABSTRAK | iv |
| ABSTRACT | v |
| KATA PENGANTAR | vi |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL | xii |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 4 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 4 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 5 |
| 1.5 Batasan masalah | 5 |
| 1.6 Metode Penelitian | 6 |
| 1.7 Sistematika Penulisan | 7 |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 9 |
| 2.1 Sistem Tenaga Listrik | 9 |
| 2.2 Aliran Daya | 11 |
| 2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik | 12 |
| 2.4 Kestabilan Tegangan | 14 |
| 2.5 Perangkat FACTS | 17 |
| 2.6 Static Var Compensator (SVC) | 23 |
| 2.6.1 Fungsi Static Var Compensator (SVC) | 23 |
| 2.6.2 Cara Kerja Static Var Compensator (SVC) | 25 |
| 2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu | 27 |
| 2.7.1 Automatic Generation Control (AGC) | 28 |
| BAB III METODE PENELITIAN | 30 |
| 3.1 Judul Penelitian | 30 |
| 3.2 Lokasi Penelitian | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 3.3 Waktu Penelitian | 30 |
| 3.4 Teknik Pengambilan Data | 30 |
| 3.5 Alur Penelitian | 31 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN..... | 33 |
| 4.1 Perencanaan Simulasi | 33 |
| 4.2 Data Penelitian: IEEE 14 Bus | 35 |
| 4.3 Hasil Simulasi | 41 |
| 4.3.1 Simulasi Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (<i>Steady State</i>)..... | 41 |
| 4.3.2 Simulasi Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban pada Kondisi Normal (<i>Steady State</i>)..... | 43 |
| 4.3.3 Simulasi Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output Bervariasi..... | 46 |
| 4.3.4 Simulasi Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) Ketika Generator Lepas Sebelum Penempatan SVC | 48 |
| 4.3.5 Simulasi Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) Ketika Generator Lepas Sesudah Penempatan SVC | 51 |
| 4.3.6 Simulasi Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output Bervariasi Sebelum Penempatan SVC..... | 54 |
| 4.3.6.1 Daya Output PLTB 50% Sebelum Penempatan SVC | 55 |
| 4.3.6.2 Daya Output PLTB 100% Sebelum Penempatan SVC | 57 |
| 4.3.7 Simulasi Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output Bervariasi Sesudah Penempatan SVC | 60 |
| 4.3.7.1 Daya Output PLTB 50% Sesudah Penempatan SVC | 60 |
| 4.3.7.2 Daya Output PLTB 100% Sesudah Penempatan SVC | 63 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 67 |
| 5.1 Kesimpulan | 67 |
| 5.2 Saran..... | 69 |
| Daftar Pustaka..... | 70 |
| LAMPIRAN..... | 72 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|---------------------|---|----|
| Gambar 2. 1 | Sistem Tenaga Listrik [1] | 9 |
| Gambar 2. 2 | Diagram Skematik TCSC [7]..... | 17 |
| Gambar 2. 3 | Rangkaian Ekuivalen TCSC [7] | 18 |
| Gambar 2. 4 | Rangkaian Ekuivalen SSSC [7] | 19 |
| Gambar 2. 5 | Rangkaian Ekuivalen STATCOM [7] | 20 |
| Gambar 2. 6 | Diagram Skematik STATCOM [7] | 21 |
| Gambar 2. 7 | Diagram Skematik UPFC [8]..... | 22 |
| Gambar 2. 8 | Pemodelan SVC [9] | 26 |
| Gambar 2. 9 | Kurva Daya Reaktif dan Tegangan pada SVC [9]..... | 26 |
| Gambar 3.1 | Alur Penelitian..... | 32 |
| Gambar 4. 1 | Single Line Diagram Sistem IEEE 14 Bus | 36 |
| Gambar 4. 2 | Single Line Diagram Sistem IEEE 14 Bus Terintegrasi PLTB | 37 |
| Gambar 4. 3 | Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal | 42 |
| Gambar 4. 4 | Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 45% pada Kondisi Normal..... | 45 |
| Gambar 4. 5 | Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output Bervariasi | 47 |
| Gambar 4. 6 | Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) ketika Generator 6 Lepas Sebelum Penempatan SVC..... | 50 |
| Gambar 4. 7 | Perbandingan Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) ketika Generator 6 Lepas Sebelum Penempatan SVC dan Sesudah Penempatan SVC Pada Bus 13 dan bus 14 | 53 |
| Gambar 4. 8 | Profil Tegangan Sistem IEEE 14 saat Kenaikan Beban 55% pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 50% Sebelum Penempatan SVC | 56 |
| Gambar 4. 9 | Profil Tegangan Sistem IEEE 14 saat Kenaikan Beban 55% pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 100% Sebelum Penempatan SVC | 59 |
| Gambar 4. 10 | Perbandingan Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% Pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 50% Sebelum Penempatan SVC dan Sesudah Penempatan SVC Pada Bus 14..... | 62 |
| Gambar 4. 11 | Perbandingan Profil Tegangan Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% Pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 100% Sebelum Penempatan SVC dan Sesudah Penempatan SVC Pada Bus 14 | 65 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|--------------------|--|----|
| Tabel 4. 1 | Data Pembangkit dan Data Beban Sistem IEEE 14 Bus | 38 |
| Tabel 4. 2 | Data Transformator Sistem IEEE 14 Bus..... | 39 |
| Tabel 4. 3 | Data Saluran Transmisi Sistem IEEE 14 Bus | 40 |
| Tabel 4. 4 | Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal | 41 |
| Tabel 4. 5 | <i>Losses</i> Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal | 43 |
| Tabel 4. 6 | Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 45% pada Kondisi Normal..... | 44 |
| Tabel 4. 7 | <i>Losses</i> Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 45% pada Kondisi Normal..... | 45 |
| Tabel 4. 8 | Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output Bervariasi ketika Seluruh Generator Beroperasi | 46 |
| Tabel 4. 9 | Perbandingan <i>Losses</i> Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal Sebelum dan Sesudah (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output Bervariasi ketika Seluruh Generator Beroperasi Sebelum Penempatan SVC | 48 |
| Tabel 4. 10 | Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) ketika Generator 6 Lepas Sebelum Penempatan SVC | 49 |
| Tabel 4. 11 | Perbandingan <i>Losses</i> Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal Sebelum dan Sesudah (Terintegrasi PLTB) ketika Generator 6 Lepas Sebelum Penempatan SVC | 51 |
| Tabel 4. 12 | Perbandingan Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) ketika Generator 6 Lepas Sebelum Penempatan SVC dan Sesudah Penempatan SVC Pada Bus 13 dan Bus 14..... | 52 |
| Tabel 4. 13 | Perbandingan <i>Losses</i> Sistem IEEE 14 Bus saat Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) ketika Generator 6 Lepas Sebelum Penempatan SVC | 54 |
| Tabel 4. 14 | Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 50% Sebelum Penempatan SVC | 55 |
| Tabel 4. 15 | <i>Losses</i> Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 50% Sebelum Penempatan SVC | 57 |
| Tabel 4. 16 | Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 100% Sebelum Penempatan SVC | 58 |
| Tabel 4. 17 | <i>Losses</i> Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 100% Sebelum Penempatan SVC | 60 |

| | |
|--|----|
| Tabel 4. 18 Perbandingan Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% Pada Kondisi Normal..... | 61 |
| Tabel 4. 19 Perbandingan Losses Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% Pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 50% Sebelum Penempatan SVC dan Sesudah Penempatan SVC Pada Bus 14..... | 63 |
| Tabel 4. 20 Perbandingan Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% Pada Kondisi Normal..... | 64 |
| Tabel 4. 21 Perbandingan Losses Sistem IEEE 14 Bus saat Kenaikan Beban 55% Pada Kondisi Normal (Terintegrasi PLTB) dengan Daya Output 100% Sebelum Penempatan SVC dan Sesudah Penempatan SVC Pada Bus 14..... | 66 |

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik merupakan salah satu kebutuhan utama bagi kehidupan masyarakat modern dalam mendukung keberlangsungan aktivitas masyarakat. Kebutuhan tenaga listrik terus meningkat seiring pertumbuhan masyarakat saat ini, karenanya diperlukan pengaturan sistem penyaluran listrik yang sesuai kebutuhan saat ini, agar pertumbuhan yang ada dapat terus berlangsung. Untuk melayani daerah perkotaan dan pedesaan perlu ditingkatkan pula pembangunan jaringan distribusi sehingga terjadi pemerataan pemakaian energi listrik. Mengingat pentingnya energi listrik bagi kehidupan masyarakat dan bagi pembangunan nasional, maka suatu sistem tenaga listrik harus bisa melayani pelanggan secara baik, dalam arti sistem tenaga listrik tersebut aman dan andal. Aman berarti bahwa sistem tenaga listrik tidak membahayakan manusia dan lingkungannya. Handal berarti sistem tenaga listrik dapat melayani pelanggan secara memuaskan misalnya dalam segi kontinuitas dan kualitas.

Dengan meningkatnya permintaan, sistem transmisi menjadi lebih *stress* yang membuat sistem lebih mudah mengalami ketidakstabilan tegangan. Kestabilan tegangan berkaitan dengan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik dalam mempertahankan tegangan di setiap bus pada kondisi normal setelah terjadinya gangguan. Sistem akan memasuki keadaan ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan permintaan beban dan adanya perubahan kondisi sistem. Keadaan tersebut akan menyebabkan keruntuhan tegangan (*voltage collapse*).

Keruntuhan tegangan (*voltage collapse*) adalah suatu prosedur dimana kemunculan peristiwa kronologis bersamaan dengan ketidakstabilan tegangan di wilayah sistem yang luas dapat menyebabkan kasus kondisi tegangan turun (*undervoltage*) yang tidak dapat diterima dalam jaringan. Peningkatan beban dapat menyebabkan permintaan daya reaktif yang ekstrim, sistem akan menunjukkan ketidakstabilan tegangan. Perubahan daya reaktif menyebabkan ketidakstabilan tegangan pada sistem seperti ketidakstabilan tegangan dan rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Rugi-rugi daya semakin besar ketika sistem beroperasi pada beban maksimum. Seiring sistem mendekati titik keruntuhan tegangan (*voltage collapse*) rugi-rugi daya nyata dan reaktif meningkat dengan cepat. Oleh karena itu, daya reaktif yang mendukung harus bersifat lokal dan memadai.

Penggunaan energi sumber terbarukan adalah suatu hal yang sangat penting. Salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). PLTB memberikan banyak keuntungan seperti bersahabat dengan lingkungan (tidak menghasilkan emisi gas), tersedia dalam banyak variasi rating (mulai dari kW sampai MW), mudah untuk dihubungkan ke grid yang ada, lahan turbinnya dapat digunakan untuk fungsi yang lain (seperti areal sawah, ladang, rumah tempat tinggal), tidak membutuhkan bahan bakar Output yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga bayu yang dihasilkan bergantung pada kekuatan angin, sehingga tidak selalu konstan atau bervariasi (*intermittent*). Apabila diintegrasikan ke dalam sistem tenaga akan menghadirkan tantangan teknis dan memerlukan pertimbangan regulasi tegangan, kestabilan, masalah kualitas daya, masalah keandalan, kelebihan beban dan transfer daya yang berlebihan di sepanjang jalur transmisi.

Dengan penempatan pengontrolan FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*), kestabilan tegangan dari kondisi sistem dapat ditingkatkan secara efektif. Salah satu peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah SVC (*Static Var Compensator*). *Static Var Compensator* (SVC) adalah alat yang dapat menghasilkan atau menyerap daya reaktif statis yang dihubungkan paralel dan mempunyai keluaran (*output*) yang bervariasi untuk menjaga atau mengontrol parameter spesifik dari suatu sistem tenaga listrik. SVC terdiri dari komponen TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), TSC (*Thyristor Switched Capacitor*) dan FC (*Filter Capacitor*). Tujuan utama pemasangan SVC adalah untuk menjaga perubahan tegangan pada bus dalam jaringan distribusi serta untuk meningkatkan stabilitas tegangan dengan cara menyuntikkan daya reaktif dengan mengendalikan arus kapasitif atau arus induktif. Untuk mencapai kinerja yang baik dari perangkat, penentuan lokasi penempatan SVC sangat penting karena harga perangkat ini sangat tinggi.

Berdasarkan hasil dari pemaparan yang ada maka kami tertarik melakukan penelitian mengenai “Perencanaan Penempatan *Static Var Compensator* Untuk Meningkatkan Kestabilan Tegangan Pada Sistem Tenaga Listrik Dengan PLTB”. Pada penelitian ini menggunakan data sekunder dari Sistem *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 14 bus. Pada penelitian ini, dilakukan analisis kestabilan tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem IEEE 14 bus dengan memperhatikan output PLTB yang bervariasi (*intermittent*) ketika keadaan normal, kondisi generator lepas dan terjadi penambahan beban daya aktif dan daya reaktif.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka dapat di rumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana penentuan lokasi penempatan SVC pada sistem tenaga listrik dengan PLTB agar menstabilkan tegangan?
2. Bagaimana kestabilan tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem tenaga listrik dengan PLTB saat daya output PLTB bervariasi?
3. Bagaimana perbandingan kestabilan tegangan dan rugi-rugi daya ketika terjadi generator lepas pada sistem tenaga listrik dengan PLTB sebelum dan sesudah penempatan SVC?
4. Bagaimana kondisi sistem tenaga listrik terintegrasi PLTB saat daya output PLTB bervariasi ketika terjadi kenaikan beban sebelum dan sesudah penempatan SVC?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah:

1. Menentukan lokasi penempatan SVC yang akan dipasang pada sistem tenaga listrik dengan PLTB agar menstabilkan tegangan.
2. Menganalisis kestabilan tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem tenaga listrik dengan PLTB saat daya output PLTB bervariasi.
3. Membandingkan kestabilan tegangan dan rugi-rugi daya ketika terjadi generator lepas pada sistem tenaga listrik dengan PLTB sebelum dan sesudah penempatan SVC.

4. Membandingkan kondisi sistem tenaga listrik dengan PLTB saat daya output PLTB bervariasi ketika terjadi kenaikan beban sebelum dan sesudah penempatan SVC.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Memberikan informasi mengenai penempatan SVC pada sistem tenaga listrik dengan PLTB untuk peningkatan kualitas tegangan.
2. Memberikan informasi mengenai kestabilan tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem tenaga listrik dengan PLTB saat daya output PLTB bervariasi.
3. Memberikan solusi untuk perbaikan tegangan ketika terjadi generator lepas pada sistem tenaga listrik dengan PLTB dengan penempatan SVC.
4. Memberikan informasi mengenai kondisi sistem tenaga listrik dengan PLTB saat daya output PLTB bervariasi ketika terjadi kenaikan beban sebelum dan sesudah penempatan SVC.

1.5 Batasan masalah

1. Sistem kelistrikan yang dianalisis adalah sistem kelistrikan IEEE 14 bus.
2. Sistem dalam keadaan normal dan keadaan perubahan beban.
3. Analisis kestabilan difokuskan pada kestabilan tegangan untuk melihat tegangan bus baik sebelum dan sesudah penempatan SVC.
4. Melakukan beberapa percobaan dalam menentukan kapasitas SVC untuk mencari kapasitas yang paling optimal.
5. PLTB yang digunakan adalah PLTB jenis generator induksi.
6. Waktu generator lepas dari sistem hanya sesaat.

1.6 Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah:

1. Studi literature

Studi literatur merupakan metode penelitian yang berisi kajian penulis atas referensi-referensi yang ada dengan cara pengadaan studi dari buku, jurnal, internet dan sumber bahan pustaka, dan informasi lain yang dapat menunjang penulisan laporan penelitian ini.

2. Pengambilan data

Dilakukan pengambilan data dimana data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder berupa data yang diperoleh dari pihak lain. Data inilah sebagai penunjang dari penelitian yang dilakukan.

3. Pengelompokan data

Metode ini bertujuan untuk:

- a. Mengumpulkan dan mengelompokkan data berdasarkan tipe dan ketentuan-ketentuan yang sejenis sehingga lebih mudah untuk dilakukan analisis.
- b. Mengetahui kekurangan data sehingga kerja menjadi efektif dan efisien.

4. Pengolahan data

Pengolahan data penelitian ini dilakukan dengan menerapkan dan melakukan simulasi pada software serta melakukan beberapa perhitungan dan penggambaran.

5. Analisa hasil pengolahan dan perbandingan data.

Dilakukan dengan tujuan untuk memperoleh simulasi sementara dan selanjutnya dilakukan perbandingan terhadap data sebelumnya sehingga menarik kesimpulan untuk diolah lebih lanjut.

6. Simpulan

Simpulan diperoleh setelah dilakukan korelasi antara hasil pengolahan data dan masalah yang diteliti sehingga simpulan merupakan hasil akhir dari penelitian ini.

1.7 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, metode penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori penunjang materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas tentang waktu dan tempat penelitian, metode pengumpulan data, serta langkah-langkah penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi hasil simulasi dan pembahasan berdasarkan rumusan masalah.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

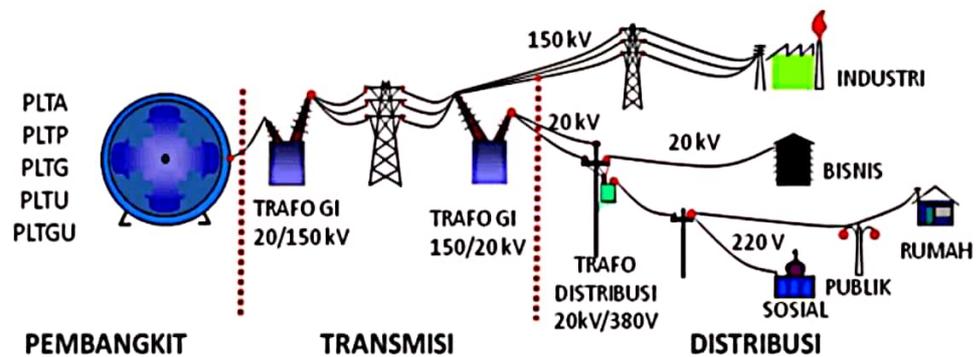
Pada bab ini berisi kesimpulan dan saran berdasarkan tujuan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik merupakan suatu gabungan yang terdiri atas komponen-komponen tenaga listrik atau alat-alat listrik seperti: pembangkit tenaga listrik (generator, trafo), sistem transmisi, sistem distribusi dan beban yang saling berkaitan satu sama lain sehingga membentuk suatu sistem. Ketiga komponen ini merupakan komponen yang sangat vital dalam sistem tenaga listrik yang bekerja dalam menyalurkan daya listrik mulai dari pusat pembangkit hingga ke pusat beban. Adapun rangkaian sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 2.1 sebagai berikut berikut [1] :



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik [1]

Berikut penjelasan mengenai komponen-komponen utama dalam sistem tenaga listrik, sebagai berikut [1] :

1. Pusat Pembangkit Listrik (*Power Plant*) merupakan tempat dibangkitkannya energi listrik. Pada bagian ini memiliki komponen seperti turbin sebagai

penggerak mula (*prime mover*) dan generator sebagai mesin yang membangkitkan listrik dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan proses induksi elektromagnetik. Selain itu, terdapat pula gardu induk yang mengubah tegangan listrik dari tinggi menjadi rendah atau sebaliknya. Dalam gardu induk terdapat peralatan utama seperti: transformer yang berfungsi untuk menaikkan tegangan generator menjadi tegangan tinggi yang sesuai dengan sistem transmisi (150 kV) dan peralatan pengaman serta peralatan pengatur. Secara umum, pembangkit listrik terbagi atas dua bagian besar: pembangkit hidro yaitu PLTA (Pembangkit Listrik Tenaga Air) dan pembangkit thermal diantaranya yaitu PLTU (Pusat Listrik Tenaga Uap), PLTG (Pusat Listrik Tenaga Gas), PLTN (Pusat Listrik Tenaga Nuklir), dan PLTGU (Pusat Listrik Tenaga Gas Uap).

2. Transmisi Tenaga Listrik merupakan tempat terjadinya proses penyaluran tenaga listrik secara besar-besaran mulai dari pusat pembangkit hingga ke pusat saluran distribusi. Dengan adanya proses penyaluran ini maka konsumen dapat memenuhi kebutuhan listriknya. Saluran transmisi tidak hanya menyalurkan energi listrik dalam keadaan normal, tetapi juga dalam keadaan darurat atau bila terjadi gangguan. Saluran transmisi ini menghubungkan jaringan tegangan tinggi melalui trafo step-down ke jaringan distribusi biasa yang disebut subtransmisi.
3. Sistem Distribusi merupakan tahap akhir dalam pengiriman tenaga listrik. Bagian ini terhubung langsung dengan konsumen listrik. Bagian ini terdiri atas: pusat pengatur atau gardu induk, gardu hubung, saluran tegangan menengah

atau jaringan primer (6 kV dan 20 kV) yang berupa saluran udara atau kabel bawah tanah, saluran tegangan rendah atau jaringan sekunder (380 V dan 220 V), gardu distribusi tegangan yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan baik tegangan menengah ataupun tegangan rendah, dan trafo.

2.2 Aliran Daya

Aliran daya merupakan suatu solusi dalam kondisi operasi sistem tenaga listrik pada keadaan *steady-state*, yang memberikan gambaran mengenai operasi sistem tenaga listrik yang dinamis. Melalui studi aliran daya pada sistem tenaga listrik ini maka akan didapatkan informasi mengenai daya nyata (*real power*), daya reaktif (*reactive power*), tegangan dan sudut fasa pada sistem. Studi aliran daya ini mencakup perhitungan aliran dan tegangan sistem pada bus tertentu. Dalam sistem tenaga listrik, bus dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu [2]:

1. Bus PQ (*Load Bus*) merupakan bus yang digunakan sebagai bus beban dimana pada bus ini daya aktif (P) dan reaktif (Q) adalah variabel yang diketahui, besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah tegangan (V) dan sudut (δ).
2. Bus PV merupakan bus dari pembangkit listrik dimana pada bus ini tegangan dapat dikontrol dengan kapasitas daya reaktif yang dibangkitkan. Pada bus PV, daya aktif (P) dan tegangan (V) ditentukan sebagai variabel yang diketahui dan besaran yang dihitung pada bus ini adalah daya reaktif (Q) dan sudut tegangan (δ).
3. *Slack Bus* atau sering juga disebut sebagai *Swing Bus* dimana dapat diketahui besaran tegangan (V) dan sudut (δ). Umumnya sistem didesain

memiliki bus yang dijadikan sebagai referensi, yaitu disebut *slack bus*, dan secara umum pada bus ini dapat diketahui besaran dari sudut pada bus adalah nol ($\delta = 0^\circ$). Besaran yang dapat dihitung pada bus ini adalah daya aktif (P) dan daya reaktif (Q).

2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi beberapa syarat, sebagai berikut [3] :

- Keandalan (*Reliability*) adalah "Kemampuan suatu sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus".
- Kualitas (*Quality*) adalah "Kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standart yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi".
- Kestabilan (*Stability*) adalah "Kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan".

Dari ketiga syarat diatas dapat dilihat bahwa sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi ketiga syarat diatas dimana sistem harus mampu memberi pasokan listrik secara terus-menerus sesuai dengan standar besaran yang telah ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi dan apabila terjadi gangguan secara tiba-tiba maka sistem harus mengembalikan pada kondisi semula sebelum terjadi gangguan dimana tegangan dan frekuensi harus kembali pada kisaran yang telah ditetapkan.

Sistem tenaga listrik mempunyai variasi beban yang sangat dinamis dimana setiap detik akan berubah-ubah, dengan adanya perubahan ini pasokan daya listrik tetap dan harus dipasok dengan besaran daya yang sesuai, bila pada saat tertentu

terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga maka perubahan ini sudah dapat dikategorikan ke dalam gangguan pada sistem tenaga listrik yakni kondisi tidak seimbang antara pasokan listrik dan permintaan energi listrik akibat adanya gangguan baik pada pembangkit ataupun pada sistem transmisi sehingga mengakibatkan kerja dari pembangkit yang lain menjadi lebih berat. Untuk itu diperlukan satu penelaahan kestabilan agar pembangkit yang terganggu tidak terlepas dari sistem.

Meskipun kestabilan sebuah sistem dapat dilihat secara menyeluruh dan meluas, tetapi untuk analisis sebuah sistem, kestabilan sistem dapat dibagi menjadi 3 kategori, sebagai berikut [4]:

1. Kestabilan mantap (*Steady State Stability*) adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama dengan kondisi sebelum terjadi gangguan dan 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*) adalah keadaan dimana gangguan - gangguan pada sistem tenaga terjadi secara 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*) 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 kondisi operasi *steady state* yang diinginkan dan sistem yang dapat kembali ke posisi semula pada saat sistem mengalami gangguan. Kestabilan transient merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan.

2.4 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan merupakan kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga kestabilan tegangan pada semua bus pada sistem setelah mengalami gangguan dan mengembalikannya ke kondisi normal. Hal ini bergantung pada kemampuan untuk menjaga kesetimbangan antara supply daya pembangkit dan beban dari suatu sistem. Biasanya gangguan yang terjadi adalah lepasnya atau bertambahnya beban dan generator yang signifikan sehingga tegangan menjadi *drop*. Kestabilan tegangan berkaitan dengan tegangan jatuh yaitu perbedaan tegangan antara tegangan kirim dan tegangan terima. Sebuah sistem dikatakan memiliki tegangan yang stabil apabila pada kondisi operasi, setiap bus, daya reaktif diberikan maka tegangan pada bus juga mengalami kenaikan. Sebuah sistem dikatakan memiliki tegangan yang tidak stabil jika setidaknya ada satu bus, apabila daya reaktif diberikan tegangan pada bus tersebut mengalami penurunan. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan bentuk penurunan atau kenaikan tegangan pada beberapa bus. Hal yang mungkin terjadi karena ketidakstabilan tegangan adalah kehilangan beban pada suatu area atau lepasnya jaringan transmisi karena bekerjanya relay proteksi

atau karena terjadi kontingensi/lepasnya saluran transmisi dan hilangnya pembangkit besar dari sistem [5].

Kestabilan tegangan dikelompokkan menjadi dua macam, berdasarkan gangguannya [6]:

- a. Kestabilan tegangan gangguan besar dikaitkan dengan kemampuan suatu sistem untuk mengendalikan tegangan mengikuti gangguan besar, seperti gangguan sistem, lepasnya pembangkitan, atau circuit contingencies. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik antara beban dan sistem, serta interaksi dari sistem proteksi dan kendali kontinyu. Rentang waktu studinya dari beberapa detik hingga puluhan menit. Oleh karena itu, simulasi dinamis jangka panjang dibutuhkan untuk analisa.
- b. Kestabilan tegangan gangguan kecil terkait berhubungan dengan kemampuan sistem untuk mengendalikan tegangan mengikuti gangguan kecil seperti kenaikan beban sistem. Bentuk kestabilan ini ditentukan antara lain oleh karakteristik beban dan kendali kontinyu. Konsep ini berguna untuk menentukan bagaimana tegangan sistem akan merespon terhadap perubahan kecil pada sistem setiap saat. Oleh sebab itu, analisis statis dapat digunakan secara efektif untuk menentukan batas stabilitas, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas, dan menguji kondisi sistem dalam cakupan luas, serta sejumlah besar skenario pasca gangguan. Kriteria untuk kestabilan tegangan gangguan kecil adalah sebagai berikut, pada kondisi operasi untuk setiap bus dalam sistem, nilai tegangan bus meningkat saat injeksi daya reaktif pada bus yang sama meningkat. Sebuah sistem dikatakan tidak stabil

tegangannya jika untuk minimal satu bus pada sistem, nilai tegangan bus menurun ketika injeksi daya reaktif pada bus yang sama meningkat. Dengan kata lain, sebuah sistem dikatakan stabil tegangannya jika sensitivitas V-Q adalah positif untuk seluruh bus, sedangkan dikatakan tidak stabil jika sensitivitas V-Q adalah negatif untuk minimal satu bus.

Istilah-istilah yang terkait dengan stabilitas tegangan dapat didefinisikan sebagai berikut [6]:

- a. Kestabilan tegangan (*voltage stability*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan pada seluruh bus dalam sistem agar tetap berada dalam batas toleransi tegangan, baik pada saat kondisi normal maupun setelah terkena gangguan.
- b. Runtuh tegangan (*voltage collapse*) adalah proses dimana ketidakstabilan tegangan berakhir pada nilai tegangan yang sangat rendah pada bagian penting dari sistem tenaga listrik.
- c. Keamanan tegangan (*voltage security*) adalah kemampuan dari sistem tenaga listrik, tidak hanya untuk beroperasi stabil, tetapi juga tetap stabil (selama sistem proteksi tetap bekerja untuk mempertahankan tegangan) setelah terjadi gangguan atau perubahan keadaan sistem yang signifikan.

Adapun standar *undervoltage* adalah penurunan nilai efektif dari tegangan yang nilainya kurang dari 90% dari tegangan nominal dan durasinya lebih dari satu menit. *Undervoltage* biasanya disebabkan oleh peristiwa gangguan atau pembebanan yang berlebihan atau saat kondisi daya pada beban lebih besar daripada daya yang dibangkitkan, sehingga mengakibatkan terjadinya

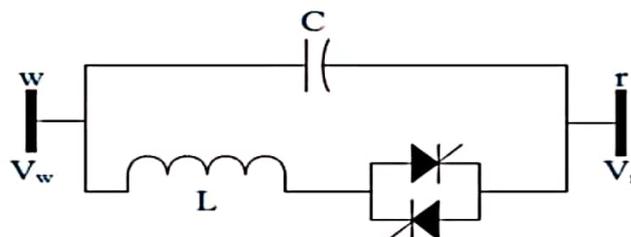
undervoltage. Berdasarkan standar tegangan IEEE, sistem kondisi normal harus dipertahankan dengan Batasan toleransi -5% - +5% atau 0,95 p.u. sampai 1,050 p.u.

2.5 Perangkat FACTS

Flexible AC Transmission System atau FACTS adalah teknologi dengan kemampuan berbasis elektronik yang terdiri dari sejumlah pengontrol. Aplikasi perangkat FACTS dalam jaringan sistem tenaga meliputi peningkatan stabilitas dinamis dan transien, peningkatan stabilitas tegangan, peningkatan kemampuan transfer daya saluran transmisi, koreksi faktor daya, peningkatan profil daya, pengaturan tegangan dan pengurangan kerugian. Perangkat FACTS meliputi TCSC, SVC, STATCOM, SSSC, UPFC dan TCVR [7].

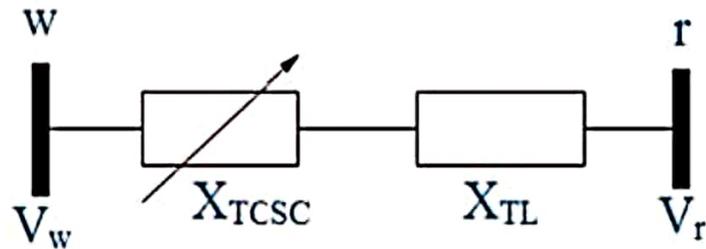
1. Kompensator Seri Pengendali Thyristor (*Thyristor Controller Series Compensator-TCSC*)

Thyristor Controller Series Compensator (TCSC) adalah salah satu FACTS yang memungkinkan pengelolaan dan promosi kemampuan transfer daya saluran transmisi dengan memvariasikan impedansi saluran transmisi ketika melakukan kompensasi induktif atau kapasitif. TCSC ini terdiri dari kapasitor yang dikendalikan secara seri, yang dihaluskan oleh Reaktor yang dikendalikan Thyristor, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Diagram Skematik TCSC [7]

Sedangkan rangkaian ekuivalen TCSC berupa reaktansi variabel dalam susunan seri dengan saluran transmisi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.

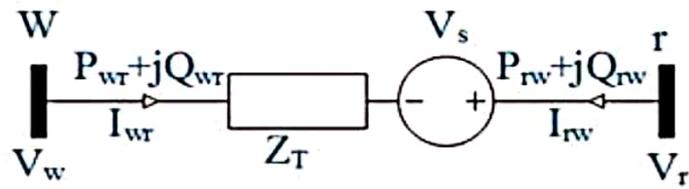


Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen TCSC [7]

Fungsi utama TCSC adalah mengontrol impedansi saluran transmisi dengan menambahkan reaktansinya dalam satu rangkaian dengan saluran transmisi, hal ini menghasilkan peningkatan kemampuan beban, maksimalisasi kapasitas transfer saluran transmisi, peningkatan keamanan dinamis dan statis, peningkatan stabilitas transien, pengurangan kerugian, pengurangan kemacetan dan redaman [7].

2. Regulator Tegangan Terkontrol Thyristor (*Thyristor Controlled Voltage Regulator-TCVR*)

Thyristor Controlled Voltage Regulator (TCVR) adalah salah satu perangkat FACTS yang digunakan untuk memasukkan tegangan fase ke tegangan bus utama untuk mengubah besarnya. Jenis perangkat FACTS ini dapat dimodelkan sebagai transformator *tap changer* yang ideal tanpa impedansi seri dan digunakan untuk mencapai peningkatan kemampuan beban. Struktur utama *Thyristor Controlled Voltage Regulator* TCVR dan rangkaian ekuivalennya dapat dilihat pada Gambar 2.4.

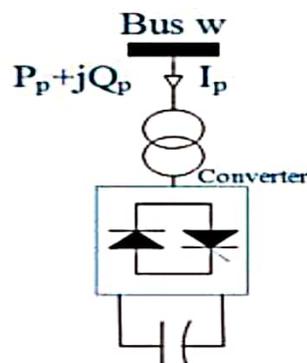


Gambar 2. 6 Rangkaian Ekuivalen SSSC [7]

Dengan mengontrol besaran dan sudut fasa dari tegangan yang diinjeksikan dalam rangkaian dengan saluran transmisi, SSSC memiliki kemampuan untuk mengontrol aliran daya dari saluran transmisi. Karena SSSC dapat menukar daya aktif dan reaktif dengan sistem transmisi SSSC, digunakan untuk manajemen kemacetan, peningkatan profil tegangan dan peningkatan kestabilan sistem dengan meredam osilasi daya [7].

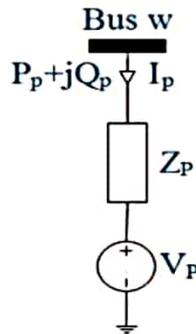
4. Kompensator Sinkronisasi Statis (*Static Synchronous Compensator-STATCOM*)

Static Synchronous Compensator (STATCOM) adalah perangkat FACTS yang terhubung dengan paralel. Terdiri dari konverter sumber tegangan, yang dihubungkan ke bus oleh kopleng trafo, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2. 5 Rangkaian Ekuivalen STATCOM [7]

Dimodelkan sebagai tegangan sumber dalam rangkaian dengan impedansi transformator kopling, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



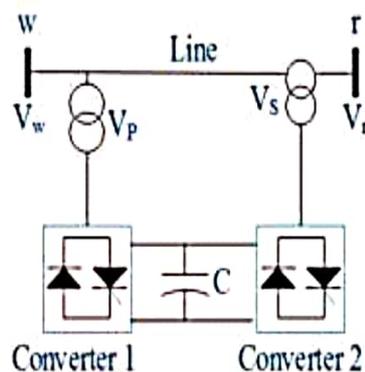
Gambar 2. 6 Diagram Skematik STATCOM [7]

STATCOM tidak dapat menyediakan atau menyerap daya aktif. Namun, secara bersamaan dapat memasok induktif dan kapasitif daya reaktif ke jaringan transmisi. STATCOM memiliki peran penting dalam regulasi tegangan, meningkatkan margin stabilitas untuk transien, osilasi sistem redaman, filtrasi harmonic dan memberikan respons cepat ketika beban daya reaktif berubah dengan cepat. Selain itu, STATCOM adalah satu-satunya perangkat FACTS yang memiliki kemampuan untuk menyediakan faktor daya persatuan untuk pembangkit listrik tenaga angin, dan menyediakan atau menyerap daya reaktif di titik sambungan ladang angin dengan jaringan untuk mengimbangi variasi tegangan atau tegangan kecil. Dalam STATCOM digunakan sebagai inverter untuk pembangkit listrik tenaga surya PV pada siang hari, dan berfungsi sebagai kompensator daya reaktif untuk sistem pada malam hari. Perangkat ini disebut PV-STATCOM [7].

5. Pengontrol Aliran Daya Terpadu (*Unified Power flow Controller -UPFC*)

Unified Power flow Controller (UPFC) terdiri dari dua konverter sumber tegangan yaitu seri dan Shunt Converter, yang dihubungkan sama lain dengan link

dc umum. *Seri Converter* atau *Static Synchronous Seri Compensator* (SSSC) yang digunakan untuk menambah besarnya tegangan dan sudut fase seri dengan garis, sementara *Shunt Converter* atau *Static Synchronous Compensator* (STATCOM) digunakan untuk menyediakan daya reaktif untuk sistem AC. Selain itu akan memberikan kekuatan DC diperlukan untuk kedua inverter, masing-masing cabang terdiri dari transformator dan Converter daya elektronik. Kedua Converter sumber tegangan berbagi umum DC kapasitor. UPFC sendiri terdiri dari dua Switching Converter yang dihubungkan secara seri dan shunt, untuk Seri Inverter dihubungkan dengan saluran transmisi melalui trafo yang dihubungkan seri, sementara Shunt Inverter dikopel dengan bus yang ingin dikontrol melalui shunt transformer. Shunt Inverter dapat menghasilkan maupun menyerap daya reaktif (mirip dengan prinsip kerja SVC) dan dapat menyediakan daya aktif ke series transformer. Sedangkan fungsi dari series inverter berkaitan dengan pengaturan tegangan [8]. Adapun diagram skematik UPFC yang ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2. 7 Diagram Skematik UPFC [8]

UPFC dimodelkan sebagai model transformator dari tiga variabel control yang meliputi tegangan besaran, sudut fasa dan rasio lilitan transformator model. UPFC

juga digunakan sebagai model injeksi saat ini. Besaran tegangan seri UPFC memberikan pengaturan tegangan, dan sudut fasa digunakan untuk pengaturan fasa sedangkan arus sumber digunakan untuk kompensasi daya reaktif [8].

2.6 Static Var Compensator (SVC)

Static VAR Compensator atau SVC merupakan peralatan listrik berfungsi untuk menyediakan kompensasi daya reaktif yang cepat pada jaringan transmisi listrik tegangan tinggi. SVC adalah bagian dari sistem peralatan AC transmisi yang fleksibel, berfungsi sebagai pengatur tegangan dan menstabilkan suatu sistem. Adapun istilah “*static*” pada kenyataannya bahwa pada saat beroperasi atau melakukan perubahan kompensasi tidak ada bagian atau *part* SVC yang bergerak, karena proses kompensasi daya reaktif sepenuhnya dikontrol oleh sistem elektronika daya. Apabila *power system* beban reaktif kapasitif (*leading*), SVC akan menaikkan daya reaktor untuk mengurangi VAR dari sistem sehingga tegangan system akan turun. Sedangkan apabila *power system* beban reaktif induktif (*lagging*), SVC akan mengurangi daya reaktor untuk menaikkan VAR dari sistem sehingga tegangan sistem akan naik. Pada SVC pengaturan besarnya VAR dan tegangan dilakukan dengan mengatur besarnya kompensasi daya reaktif induktif pada reaktor, sedangkan kapasitor bank bersifat statis [5].

2.6.1 Fungsi Static Var Compensator (SVC)

Kebutuhan daya reaktif pada sistem dapat dipasok oleh unit pembangkit, sistem transmisi, reaktor dan kapasitor. Karena kebutuhan daya reaktif pada sistem bervariasi yang disebabkan oleh perubahan beban, komposisi unit pembangkit yang beroperasi, perubahan konfigurasi jaringan, sehingga berdampak pada

bervariasinya level tegangan pada gardu induk. Pada umumnya gardu-gardu induk yang berada jauh dari pembangkit akan mengalami penurunan level tegangan yang paling besar, oleh sebab itu diperlukan sistem kompensasi daya reaktif yang dapat mengikuti perubahan tegangan tersebut. SVC dapat dengan cepat memberikan *supply* daya reaktif yang diperlukan dari sistem sehingga besarnya tegangan pada gardu induk dapat dipertahankan sesuai dengan standar yang diizinkan. Kestabilan tegangan pada gardu induk akan meningkatkan kualitas tegangan yang sampai pada konsumen, mengurangi *losses* dan juga dapat meningkatkan kemampuan penghantar untuk mengalirkan arus. Pengaturan daya reaktif dilakukan dengan mengontrol besarnya daya reaktif pada reaktor, melalui pengaturan sudut penyulutan pada *thyristor*.

Besarnya sudut penyulutan ini bergantung dari variasi tegangan pada gardu induk dengan kata lain semakin besar daya reaktif yang dibutuhkan maka sudut penyalaan akan semakin kecil. Karena kontrol sudut penyalaan ini dilakukan secara elektronik maka pengaturan tegangan dapat dilakukan secara lebih halus dan cepat. *Thyristor* pada kondisi beroperasi akan menghasilkan panas sehingga diperlukan sistem pendingin untuk mendinginkannya. SVC dapat dimodelkan sebagai pemasok daya reaktif yang ideal ketika dihubungkan ke bus, sementara itu dimodelkan sebagai admitansi variabel jika shunt terhubung ke saluran transmisi. Secara rinci fungsi dari SVC adalah: meningkatkan kapasitas sistem transmisi, kontrol tegangan, kontrol aliran daya reaktif, penurunan dan pembatasan frekuensi *over voltage power* disebabkan *load rejection*, memperbaiki kestabilan jaringan AC, dan mencegah terjadinya ketidakstabilan tegangan [5].

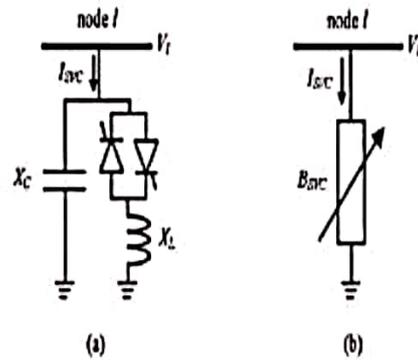
2.6.2 Cara Kerja Static Var Compensator (SVC)

SVC terdiri dari TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), TCS (*Thyristor Capacitor Switched*) dan *filter*. *Filter* berfungsi untuk mengatasi besarnya harmonisa yang dihasilkan oleh TCR. SVC juga terdiri dari kapasitor, reaktor dan *thyristor*. Prinsip kerja *Static Var Compensator* (SVC) yaitu dengan cara mengatur sudut penyalaan *thyristor*, sehingga dapat mengatur keluaran daya reaktif dari SVC dan besarnya arus reaktor. Arus yang diterima oleh SVC merupakan penjumlahan dari arus kapasitor dan arus reaktor. Besarnya arus kapasitor tetap, yang diubah adalah besarnya nilai reaktor yang tepat arus yang diterima oleh kompensator daya reaktif statis dapat divariasikan dari kapasitif hingga induktif. Nilai tegangan sistem merupakan input bagi pengendali, yang kemudian akan mengatur sudut penyalaan *thyristor*. Dengan demikian, SVC akan memberikan kompensasi daya reaktif maupun mengambil daya reaktif yang sesuai dengan kebutuhan sistem [5].

Untuk menganalisa injeksi daya reaktif SVC pada suatu sistem tenaga listrik, SVC dapat dimodelkan dengan beberapa cara sebagai berikut [9]:

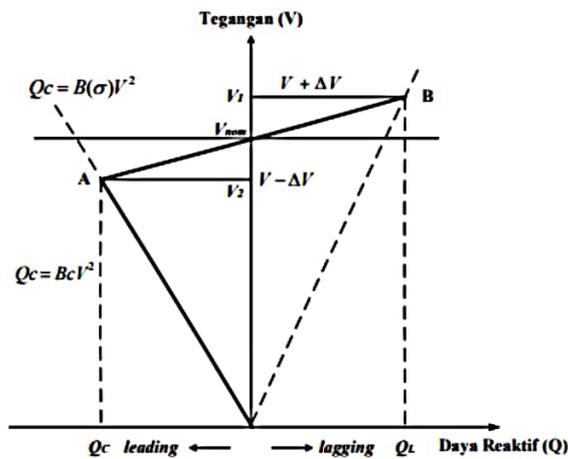
- a. *Model Firing Angle SVC*. Pemodelan SVC ini berupa reaktansi ekuivalen X_{svc} , yang merupakan fungsi dari perubahan sudut penyalaan α , yang terdiri dari kombinasi paralel admitansi ekuivalen *thyristor controlled reactor* (TCR) dan reaktansi kapasitif tetap, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10 (a). Model ini memberikan informasi mengenai sudut penyalaan SVC yang diperlukan untuk mencapai tingkat kompensasi tertentu.
- b. *Model Total Susceptance SVC*. SVC dilihat sebagai sebuah reaktansi yang dapat diatur melalui perubahan *susceptansi* B_{svc} , yang melambangkan nilai

susceptansi SVC total yang diperlukan untuk mempertahankan besar tegangan bus pada nilai tertentu, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10 (b).



Gambar 2. 8 Pemodelan SVC, (a) model firing angle SVC, (b) model total susceptance SVC [9]

Kurva daya reaktif yang dihasilkan SVC terhadap tegangan bus yang dipasang SVC ditunjukkan pada Gambar 2.11 berikut ini:



Gambar 2. 9 Kurva Daya Reaktif dan Tegangan pada SVC [9]

Terdapat tiga area kerja SVC, yaitu [9]:

1. Area kerja pertama terdapat di antara V_1 dan V_2 . Di area ini, SVC bersifat kapasitif atau induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah-ubah sesuai kebutuhan sistem.

2. Area kerja kedua, bila tegangan bus melebihi V_1 . Di area ini SVC memiliki karakteristik induktif. Daya reaktif yang dihasilkan berubah-ubah sesuai kebutuhan sistem.
3. Area kerja ketiga bila tegangan kurang dari V_2 . Di area ini hanya berfungsi sebagai *fixed capacitor* saja.

2.7 Pembangkit Listrik Tenaga Bayu

Pembangkit Listrik Tenaga Bayu adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan angin sebagai sumber energi untuk menghasilkan energi listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) adalah pembangkit listrik energi terbarukan yang tumbuh pesat di berbagai negara maju. Sumber energi bayu berasal dari pergerakan udara akibat perubahan temperatur udara karena pemanasan dari radiasi matahari. Energi angin merupakan energi alternatif yang mempunyai prospek baik karena selalu tersedia di alam, dan merupakan sumber energi yang bersih dan terbarukan kembali. Energi angin adalah aliran angin yang terjadi akibat adanya perbedaan suhu antara dua tempat dengan kecepatan tertentu. Udara panas di suatu tempat pada permukaan bumi menjadi lebih ringan dan naik ke atas. Oleh karena itu, dalam hal mengisi kekosongan udara di tempat tersebut, maka udara yang lebih dingin akan bergerak ke tempat yang panas, sehingga terjadilah pergerakan udara/angin. Energi pada angin adalah energi kinetik yang dapat dikonversikan menjadi energi mekanik sehingga menghasilkan energi listrik dengan menggunakan sebuah turbin angin

Proses pemanfaatan energi angin melalui dua tahapan konversi yaitu: 1. Aliran angin akan menggerakkan rotor (baling-baling) yang menyebabkan rotor berputar

selaras dengan angin bertiup. 2. Putaran rotor dihubungkan dengan generator sehingga dapat dihasilkan listrik. Dengan demikian energi angin merupakan energi kinetic atau energi yang disebabkan oleh kecepatan angin untuk dimanfaatkan memutar sudu-sudu kincir angin [10].

2.7.1 Automatic Generation Control (AGC)

Dalam sistem tenaga listrik, *Automatic Generation Control (AGC)* adalah sistem untuk menyesuaikan output daya dari beberapa generator di berbagai pembangkit listrik dalam menanggapi perubahan beban. Karena jaringan listrik mengharuskan generasi dan beban erat menyeimbangkan saat ke saat, seiring penyesuaian output daya dari generator yang diperlukan. Keseimbangan dapat dinilai dengan mengukur frekuensi sistem; jika meningkat, lebih banyak kekuatan yang dihasilkan dari generasi, dan semua mesin dalam sistem mempercepat. Jika frekuensi sistem menurun, lebih beban pada sistem dibandingkan generasi seketika dapat memberikan, dan semua generator melambat.

Automatic Generation Control (AGC) adalah untuk memberikan sinyal kontrol untuk mengatur output daya nyata dari berbagai generator listrik dalam area yang ditentukan sebagai respons terhadap perubahan frekuensi sistem dan pembebanan sehingga mempertahankan frekuensi sistem terjadwal dan menetapkan pertukaran dengan area lain. Performa dari AGC tergantung pada bagaimana berbagai unit pembangkit listrik merespon sinyal-sinyal ini. Respon kecepatan mereka dibatasi oleh jeda waktu dari berbagai dinamika turbin dan sistem tenaga itu sendiri. Dengan kata lain, desain AGC tergantung pada berbagai dinamika sumber energi yang terlibat dalam AGC area tersebut [11].

Tujuan utama sistem AGC adalah untuk menjamin bahwa fungsi berikut dibentuk : (i) Frekuensi tegangan bus dan arus yang bervariasi dijaga pada atau mendekati nilai nominal khusus, (ii) Aliran daya diantara area terinterkoneksi dijaga pada level khusus, (iii) Daya total yang dikehendaki pada sistem sebagai suatu keseluruhan terbagi pada individu generator dalam suatu ragam optimum secara ekonomis. Perubahan daya aktif memberikan efek utama pada frekuensi sistem, disamping itu daya reaktif kurang sensitif untuk merubah frekuensi, tetapi utamanya merubah magnitude tegangan [12].