

TUGAS AKHIR

STUDI PEMASANGAN *DISTRIBUTED STATIC COMPENSATOR* (D-STATCOM) PADA SISTEM DISTRIBUSI ENERGI LISTRIK MAKASSAR



*Sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik
Departemen Teknik Eelektro
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin*

Oleh :

RISKIANI
D411 16 015

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2020



LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

STUDI PEMASANGAN *DISTRIBUTED STATIC COMPENSATOR* (DSTATCOM) PADA SISITEM DISTRIBUSI ENERGI LISTRIK MAKASSAR

Disusun Oleh:

RISKIANI
D41116015

Disusun dalam Rangka Memenuhi Salah Satu Pernyataan untuk Menyelesaikan

Program Strata-1 pada Sub-Program Teknik Energi.

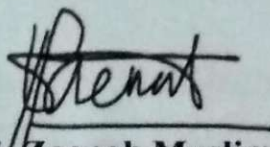
Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Makassar, 28 Juli 2020

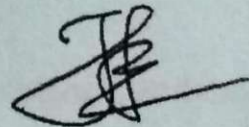
Disahkan Oleh:

Pembimbing I

Pembimbing II



Ir. Hj. Zaenab Muslimin, MT
NIP. 19660201 199202 2 002



Dr. Indar Chaerah Gunadin, S.T., MT.
NIP. 19731118 199803 2 001

Mengetahui,

Plt. Ketua Departemen Teknik Elektro



Prof. Baharuddin Hamzah., ST. M. Arch, Ph.D
NIP. 19690308 199512 1 001



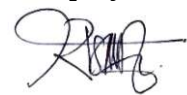
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan dibawah ini, nama Riskiani, dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang berjudul “Studi Pemasangan *Distributed Static Compensator* (D-STATCOM) Pada Sistem Distribusi Energi Listrik Makassar”, 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 temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Makassar, 15 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,



Riskiani

D411 16 015



ABSTRAK

Riskiani, Studi Pemasangan *Distributed Static Compensator* (D-STATCOM) Pada Sistem Distribusi Energi Listrik Makassar (dibimbing oleh Zaenab Muslimin dan Indar Chaerah Gunadin)

Dalam mendukung pertumbuhan ekonomi suatu daerah peran industri sangat diperlukan. Kelancaran suatu industri tidak lepas dari kualitas kelistrikan yang ada dalam hal ini adanya drop tegangan. Drop tegangan terjadi karena adanya pengaruh beban dan jarak saluran distribusi yang cukup jauh. Untuk meminimalkan drop tegangan yang terjadi diperlukan *volatage regulator* yang bekerja secara otomatis. Pada penelitian ini digunakan *Distributed Static Compensator* (D-STATCOM) sebagai *volatage regulator*. D-STATCOM dapat menghasilkan daya reaktif dan menyerap daya reaktif sesuai dengan kebutuhan sistem. Adapun sistem yang digunakan adalah sistem distribusi feeder Kima yang merupakan wilayah yang terdapat banyak industri. *Software* yang digunakan untuk melakukan simulasi pemasangan D-STATCOM adalah PSAT MATLAB 2.1.9. Simulasi dilakukan dengan dua keadaan yang berbeda yaitu keadaan normal dan keadaan saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. Hasil simulasi sistem dalam keadaan normal diperoleh bus 73 memiliki tegangan 0.90302 pu setelah pemasangan D-STATCOM naik menjadi 0.94597 pu. Sedangkan ketika sistem mengalami gangguan tegangan pada bus 73 adalah 0.89790 pu setelah pemasangan D-STATCOM tegangan bus 73 adalah 0.94010 pu.

Kata Kunci: kestabilan tegangan, D-STATCOM, sistem distribusi feeder Kima, PSAT.



ABSTRACT

Riskiani, Study of Installing Distributed Static Compensator (D-STATCOM) in Makassar Electric Energy Distribution System (guided by Zaenab Muslimin and Indar Chaerah Gunadin)

In supporting the economic growth of a region, the role of industry is needed. The smooth running of an industry cannot be separated from the existing electrical quality, in this case the voltage drop. The voltage drop occurs because of the influence of the load and the distance of the distribution channel which is quite far. To minimize the voltage drop that occurs, a volatage regulator that works automatically is needed. In this study, Distributed Static Compensator (D-STATCOM) was used as a volatage regulator. D-STATCOM can generate reactive power and absorb reactive power according to system requirements. The system used is the Kima feeder distribution system, which is an area with many industries. The software used to simulate the installation of D-STATCOM is PSAT MATLAB 2.1.9. The simulation is carried out in two different conditions, namely the normal state and the state when there is a three-phase short circuit fault. The simulation results under normal conditions obtained that bus 73 has a voltage of 0.90302 pu after the installation of D-STATCOM increases to 0.94597 pu. Meanwhile, when the system has a problem, the voltage on bus 73 is 0.89790 pu. After the installation of D-STATCOM, the 73 bus voltage is 0.94010 pu.

Keywords: voltage stability, D-STATCOM, Kima feeder distribution system, PSAT.



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat serta kasih-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul : “Studi Pemasangan *Distributed Static Compensator* (D-STATCOM) Pada Sistem Distribusi Energi Listrik Makassar”.

Terselesainya skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga pada kesempatan inidengan 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 skripsi ini hingga selesai. Maka, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tulus kepada :

a. Lingkungan Kampus :

1. Ibu Ir. Hj. Zaenab, MT dan Bapak Dr. Indar Chaerah Gunadin, ST., MT selaku dosen pembimbing skripsi saya yang telah memberikan kritik dan saran bimbingan maupun arahan yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.
2. Bapak Dr. Ir. Yustinus Sombolayuk, MT dan Ibu Hasniaty, ST., MT selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi.
3. Bapak/Ibu dosen dan staff di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin khususnya program studi Teknik Elektro yang telah banyak membantu saya selama menjalani masa studi.



4. Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, MT Ketua Departemen Teknik Elektro.

5. Seluruh pihak PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Utara.

b. Lingkungan Keluarga :

1. Kedua orang tua dan Kakak – 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 skripsi ini.

2. KI2A *Official* (Icha, Amel, Alya) yang selalu baik, menampung semua keluhan saya, selalu menyemangati saya, selalu menolong saya, dan selalu memberi solusi, *lupyu gengs*.

3. Kepada teman-teman Nandemonai (Adul, Aidil, Reyhan, Riang, Adnan, Wira, Ari, Arya, Julian, Gafur, dan yang paling terkhusus Piud) terima kasih banyak kebaikannya, terima kasih sudah kasih tempat untuk Qq ada di Nande.

4. Kepada Kanda *zenior* Arif Rahman Juanda, terima kasih selalu membantu saya menyelesaikan revisian.

5. Kepada teman-teman Etarbiv (Icha, Amel, Alya, Pida, Nita, Dhea, Shania) yang tersayang, terima kasih segala bantuan dan kebaikannya untuk saya.

Saudari Cindy Firdayani yang selalu menghibur diwaktu saya mengerjakan skripsi.



7. Kepada keluarga *Official* SKJ (Amel, Icha, Alya, Shania, Fauzan, Restu, Reyhan, Amin, Gafur, Ryan) dan Fikri, terima kasih bantuan pengetahuan dan hiburannya selama pengerjaan skripsi ini.
8. Kepada Fiqram, Nia, Allu, dan Nasrullah, terima kasih menjadi teman pertama saya di Teknik dan selalu memberi bantuan kepada saya.
9. Kepada teman-teman seperjuangan riset Laboratorium Relay dan Pengukuran, terima kasih kerjasamanya dalam setiap kegiatan Lab.
10. Kepada teman-teman Asisten Laboratorium Fisika Dasar yang memberi pengalaman dan pengetahuan tambahan.
11. Kepada teman-teman EXCITER16 terima kasih kebersamaan dan kekompakannya.
12. Kepada semua pihak yang terlibat dan tidak dapat saya sebut satu persatu, terima kasih yang tak terhingga atas semua dukungan dan bantuannya.

Akhir kata semoga skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua, aamiin.

Makassar, Juni 2020

Penulis



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR	ii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH	ii
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	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik	5
2.2. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Penyaluran Pada SUTM.....	7
2.3. Persyaratan Sistem Distribusi Tenaga Listrik	7
2.4. Perhitungan Jatuh Tegangan.....	8
2.5. Stabilitas Tegangan	10
2.6. Kurva P - V	10
Kurva Q-V.....	11
Penyelesaian Aliran Daya.....	12



2.9.	Klasifikasi Bus	13
2.10.	D-STATCOM	15
2.11	<i>Power System Analysis Toolbox (PSAT)</i>	21
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		23
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	23
3.2	Alat dan Instrumen Penelitian	23
3.3	Teknik Pengumpulan Data	23
3.4	Jenis Penelitian.....	24
3.5	Diagram Alir Penelitian.....	25
3.6	Metode Analisis Data	27
3.7	Skenario Studi Kasus Sistem Distribusi Kima.....	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		41
4.1	Validasi PSAT.....	41
4.2	Simulasi Saat Sistem Normal	43
4.2.1	Sebelum menggunakan D-STATCOM.....	43
4.2.2	Menggunakan D-STATCOM	45
4.3	Simulasi Saat Terjadi Gangguan	54
4.3.1	Sebelum Menggunakan D-STATCOM	54
4.3.2	Menggunakan D-STATCOM	60
BAB V SIMPULAN DAN SARAN		67
5.1	Simpulan	67
5.2	Saran	68
DAFTAR PUSTAKA		69
AN.....		73



DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1 SISTEM PENDISTRIBUSIAN TENAGA LISTRIK.....	6
GAMBAR 2.2 CONTOH SISTEM 2 BUS.....	9
GAMBAR 2.3 KURVA P-V	11
GAMBAR 2.4 KURVA P – Q.....	12
GAMBAR 2.5 DIAGRAM BLOK D-STATCOM.....	17
GAMBAR 2.6 VEKTOR SEBELUM DIKOMPENSASI.....	19
GAMBAR 2.7 VEKTOR SETELAH DIKOMPENSASI	19
GAMBAR 2.8 PSAT 2.1.9	22
GAMBAR 3. 1 DIAGRAM ALIR PENELITIAN	26
GAMBAR 3. 2 SKETSA SIMULASI PSAT MAKASSAR UTARA	27
GAMBAR 4. 1 PERBANDINGAN TEGANGAN SAAT MENGGUNAKAN D- STATCOM DAN TANPA D-STATCOM	50



DAFTAR TABEL

TABEL 2.1 KLASIFIKASI BUS PADA SISTEM TENAGA.....	15
TABEL 3. 1 DATA IMPEDANSI SALURAN	37
TABEL 3. 2 DATA IMPEDANSI TRANSFORMATOR.....	38
TABEL 3. 3 DATA BEBAN	39
TABEL 4. 1 PROFIL TEGANGAN KONDISI AWAL	44
TABEL 4. 2 PROFIL TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH PEMASANGAN D-STATCOM.....	48
TABEL 4. 3 PROFIL TEGANGAN SAAT TERJADI GANGGUAN DI BUS 655	
TABEL 4. 4 PROFIL TEGANGAN KETIKA TERJADI GANGGUAN DI BUS 42.....	56
TABEL 4. 5 PROFIL TEGANGAN SAAT TERJADI DI BUS 69	58
TABEL 4. 6 PERBANDINGAN TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH MENGUNAKAN D-STATCOM SAAT TERJADI GANGGUAN DI BUS 6 61	
TABEL 4. 7 PERBANDINGAN TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH MENGUNAKAN D-STATCOM SAAT TERJADI GANGGUAN DI BUS 42	63
TABEL 4. 8 PROFIL TEGANGAN SEBELUM DAN SESUDAH PEMASANGAN D-STATCOM.....	65



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan zaman, penggunaan energi listrik juga semakin bertambah. Semakin besar energi listrik yang dibutuhkan, maka semakin besar pula sistem kelistrikan yang diperlukan. Prof. Iwa Garniwa Mulya, Guru Besar Fakultas Teknik Universitas Indonesia mengatakan listrik merupakan infastruktur penting dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, mendorong investasi, dan pemerataan industri, yang berdampak lanjutan bagi penciptaan lapangan kerja dan ekonomi daerah [1]. Namun dalam penyalurannya terdapat berbagai macam masalah seperti terjadinya ketidakseimbangan pada sistem distribusi yang dipengaruhi oleh jenis beban. Beban kapasitif yang bersifat menyimpan tegangan sementara, cenderung mengakibatkan nilai tegangan jaringan menjadi lebih tinggi daripada yang seharusnya. Sedangkan beban induktif yang bersifat menyerap arus listrik, cenderung membuat tegangan listrik jaringan turun.

Drop tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang dalam suatu penghantar yang dapat terjadi karena suatu penghantar mempunyai tahanan. Besar tahanan suatu penghantar sangat dipengaruhi oleh luas penampang penghantar tersebut. Oleh karena itu, penyaluran jarak jauh dan padatnya penduduk sangat

akan terjadinya drop tegangan. Akibat dari drop tegangan, rugi-rugi daya akan semakin besar yang secara langsung sangat merugikan PT. PLN (Persero) penyedia tenaga listrik di Indonesia. Jatuh tegangan tidak bisa dihilangkan,



tetapi hanya bisa diminimalkan (direduksi). Metode untuk menjaga kestabilan tegangan pada jaringan distribusi yang akan diteliti adalah penerapan *Distributed Static Compensator (D-STATCOM)*.

D-STATCOM dapat menghasilkan variable induktif maupun kapasitif secara kontinyu hingga pada level rating maksimum MVA. Dengan mengecek bentuk gelombang dari line dengan memperhatikan sinyal AC sumber, D-STATCOM dapat mengkompensasi arus leading maupun lagging ketika terjadi tegangan fluktuasi.

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan diatas, maka akan dilakukan penelitian yang berjudul **Studi Pemasangan *Distributed Static Compensator (D-STATCOM)* Pada Sistem Distribusi Energi Listrik Makassar.**

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimanakah profil tegangan pada setiap bus sebelum dan sesudah pemasangan D-STATCOM saat sistem dalam keadaan normal?
2. Berapakah besarnya kapasitas D-STATCOM untuk memperbaiki kestabilan tegangan pada sistem distribusi Kima ?
3. Bagaimanakah perubahan tegangan saat pemasangan D-STATCOM pada sistem distribusi Kima ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa?



1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan profil tegangan setiap bus sebelum dan sesudah pemasangan D-STATCOM ketika sistem dalam keadaan normal.
2. Menentukan besarnya kapasitas D-STATCOM dalam mempertahankan kestabilan tegangan.
3. Menentukan bagaimana perubahan tegangan saat pemasangan D-STATCOM ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa.

1.4 Batasan Masalah

Untuk memfokuskan penelitian pada bagian yang dianggap penting, maka penulis melakukan pembatasan masalah sebagai berikut :

1. Analisis yang dilakukan menggunakan data sistem distribusi feeder Kima.
2. Feeder Kima terletak di Jalan Kima Raya 3, Kelurahan Paccerakang, Kecamatan Biringkanaya, Kota Makassar.
3. Data sistem diperoleh dari PT. PLN (Persero) UP3 Makassar Utara.
4. Penelitian ini menggunakan PSAT MATLAB 2014a.
5. Untuk melakukan simulasi pada PSAT dilakukan modifikasi data yang diperoleh yaitu dengan membuat bus penghubung pada setiap transformator distribusi.
6. Penelitian ini tidak membahas sistem proteksi pada sistem
7. Penelitian ini hanya membahas kestabilan tegangan dalam hal drop tegangan.



1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Secara akademis, diharapkan penelitian ini dapat bermanfaat bagi penambahan referensi yang berkaitan dengan D-STATCOM di Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin.
2. Secara Praktis, penelitian ini diharapkan bermanfaat bagi pihak PT. PLN (Persero) khususnya di sistem distribusi Makassar.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

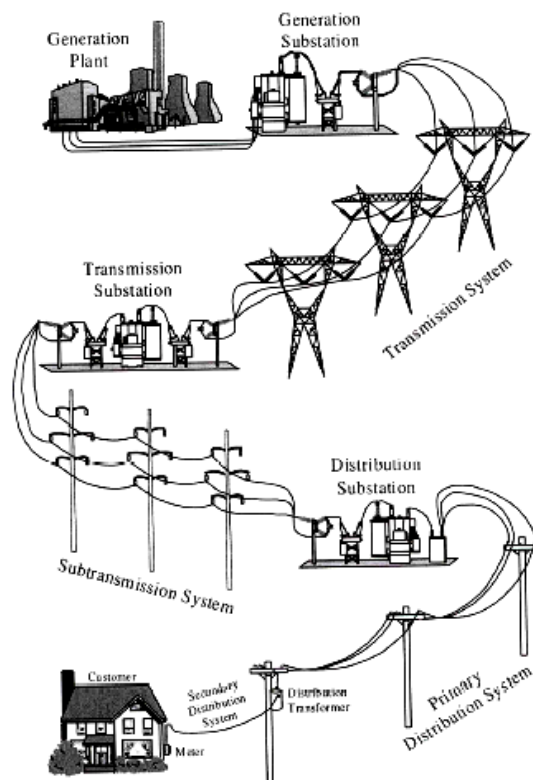
Sistem penyaluran tenaga listrik dari pembangkit tenaga listrik ke konsumen (beban), merupakan hal penting untuk dipelajari. Mengingat penyaluran tenaga listrik ini, prosesnya melalui beberapa tahap, yaitu dari pembangkit tenaga listrik penghasil energi listrik, disalurkan ke jaringan transmisi (SUTET) langsung ke gardu induk. Dari gardu induk tenaga listrik disalurkan ke jaringan distribusi primer (SUTM), dan melalui gardu distribusi langsung ke jaringan distribusi sekunder (SUTR), tenaga listrik dialirkan ke konsumen. Dengan demikian sistem distribusi tenaga listrik berfungsi membagikan tenaga listrik kepada pihak pengguna melalui jaringan tegangan rendah (SUTR), sedangkan suatu saluran transmisi berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik bertegangan ekstra tinggi ke pusat-pusat beban dalam daya yang besar (melalui jaringan distribusi) [3].

Sistem Distribusi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik. Sistem distribusi ini berguna untuk menyalurkan tenaga listrik dari sumber daya listrik besar (*Bulk Power Source*) sampai ke konsumen. Jadi fungsi distribusi tenaga listrik adalah; 1) pembagian atau penyaluran tenaga listrik ke beberapa tempat (pelanggan), dan 2) merupakan sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan, karena catu daya pada pusat-pusat beban

(an) dilayani langsung melalui jaringan distribusi [4]. Secara umum

n dari sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 2.1





Gambar 2.1 Sistem Pendistribusian Tenaga Listrik

Gambar 2.1 adalah sistem distribusi tenaga listrik mulai dari pusat pembangkit tenaga listrik hingga konsumen yaitu tenaga listrik yang dihasilkan dan dikirimkan ke konsumen melalui Pusat Pembangkit Tenaga Listrik, Saluran Transmisi, Gardu Induk, Saluran Distribusi, dan kemudian ke beban (konsumen tenaga listrik). Sistem jaringan tenaga listrik adalah penyaluran energi listrik dari pembangkit tenaga listrik (*power station*) hingga sampai kepada konsumen (pemakai) pada tingkat tegangan yang diperlukan [3].

2.2. Faktor-Faktor Yang Mempengaruhi Penyaluran Pada SUTM

Penyaluran daya listrik dari pembangkit sampai ke konsumen melalui suatu sistem penyaluran yang panjang, terdapat parameter-parameter yang mempengaruhi besaran tenaga listrik yang diterima. Adapun yang mempengaruhi sistem penyaluran daya listrik pada saluran udara tegangan menengah adalah sebagai berikut.

Pengaruh eksternal : Pengaruh eksternal adalah pengaruh lingkungan yang sering mengakibatkan terjadinya gangguan – gangguan pada sistem sehingga menyebabkan pemadaman listrik, tingkat tegangan yang menurun, serta ayunan tegangan yang diakibatkan oleh faktor alam seperti angin, gempa bumi, badai dan gunung meletus. Sedangkan pengaruh hewan dan manusia terjadi perusakan alam seperti penebangan pohon di dekat jaringan listrik.

Pengaruh Internal : Pengaruh internal adalah pengaruh yang dialami oleh saluran listrik tegangan menengah akibat dari kondisi penyaluran tenaga listrik. Pengaruh internal dapat menyebabkan terjadi perubahan listrik yang dikirim dari pusat pembangkitan ke konsumen tenaga listrik. Sehingga untuk memperbaiki perlu dikompensasi dengan peralatan – peralatan bantu distribusi. Pengaruh internal yang dimaksud adalah resistansi, induktansi, dan kapasitansi [5].

2.3. Persyaratan Sistem Distribusi Tenaga Listrik



alam usaha meningkatkan kualitas, keterandalan, dan pelayanan tenaga konsumen, maka diperlukan persyaratan sistem distribusi tenaga listrik

yang memenuhi alasan-alasan teknis, ekonomis, dan sosial sehingga dapat memenuhi standar kualitas dari sistem pendistribusian tenaga listrik tersebut.

Salah satu syarat sistem distribusi tenaga listrik adalah faktor kualitas daya, yaitu :

1. Kualitas tegangan listrik yang sampai ke titik beban harus memenuhi persyaratan minimal untuk setiap kondisi dan sifat-sifat beban. Oleh karena itu diperlukan stabilitas tegangan (*voltage regulator*) yang bekerja secara otomatis untuk menjamin kualitas tegangan sampai ke konsumen stabil.
2. Tegangan jatuh atau tegangan drop dibatasi pada harga 10 % dari tegangan nominal sistem untuk setiap wilayah beban. (*Lihat IEC Publication 38/1967*). Untuk itu untuk daerah beban yang terlalu padat diberikan beberapa voltage regulator untuk menstabilkan tegangan.
3. Kualitas peralatan listrik yang terpasang pada jaringan dapat menahan tegangan lebih (*over voltage*) dalam waktu singkat [3].

2.4. Perhitungan Jatuh Tegangan

Perhitungan jatuh tegangan pada jaringan distribusi adalah selisih antara tegangan pangkal pengirim (*sending end*) dengan tegangan pada ujung penerima (*receiving end*). Jatuh tegangan terjadi karena ada pengaruh dari tahanan dan reaktansi saluran, perbedaan sudut fasa antara arus dan tegangan serta besar arus beban, jatuh tegangan pada saluran bolak-balik tergantung pada impedansi, beban,

dan rugi tegangan dapat dinyatakan dengan persamaan:

$$\begin{aligned} V &= (R_s + jX_s) \times I_s \\ &= Z \times I_s \end{aligned} \quad (2.1)$$

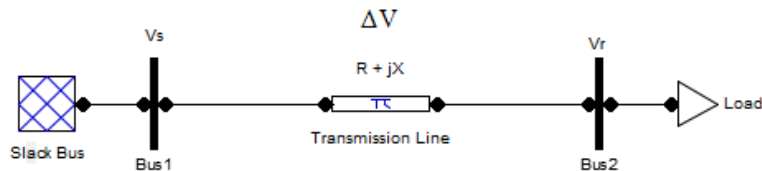


dimana :

I = Arus (A)

Z = Impedansi (Ω)

Untuk drop tegangan pada saluran dapat digambarkan pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Contoh Sistem 2 Bus

Maka besarnya drop tegangan adalah $\Delta V = V_s - V_r$ (2.2)

dimana :

ΔV = drop tegangan (V)

V_s = tegangan pada sisi pengirim (V)

V_r = tegangan pada sisi penerima (V)

Besar nilai persentase (%) rugi tegangan adalah [6]:

$$\Delta V (\%) = \frac{\Delta V}{V} \times 100\% \quad (2.3)$$

dimana :

$\Delta V (\%)$ = Rugi tegangan dalam persen (V)

V = Tegangan kerja (V)

ΔV = Rugi tegangan (V)

Penurunan tegangan maksimum pada beban penuh, yang diperbolehkan

di titik pada jaringan distribusi (SPLN 72. 1987)SUTM = 5% dari

tegangan kerja bagi sistem radial, trafo distribusi = 3% dari tegangan kerja, saluran



tegangan rendah = 4% dari tegangan kerja tergantung kepadatan beban, sambungan rumah = 1% dari tegangan nominal [5].

2.5. Stabilitas Tegangan

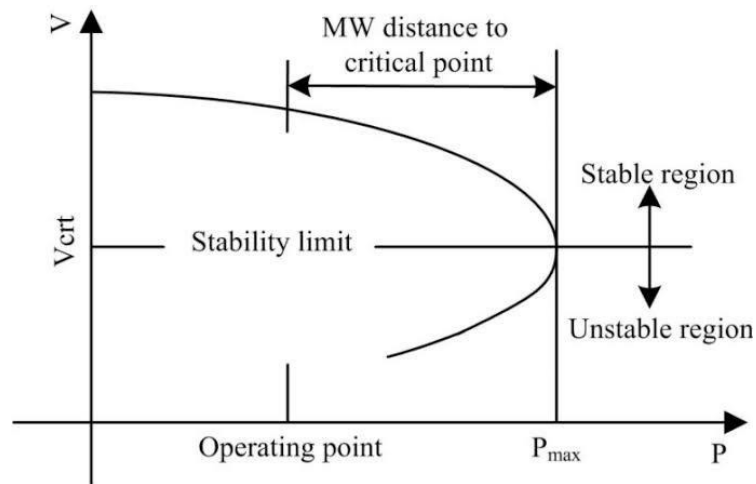
Stabilitas tegangan mengacu pada kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan pada kondisi stabil pada semua bus dalam sistem tenaga listrik setelah terjadi gangguan dari kondisi operasi awal yang diberikan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan/mengembalikan keseimbangan antara permintaan beban dan suplai beban dari sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam hasil sebuah progresif menurun atau kebangkitan tegangan beberapa bus, dari hasil ketidakstabilan tegangan hilangnya beban di area atau tersandung jaringan transmisi dan elemen lain. Ketidakstabilan frekuensi dapat mengakibatkan terjadinya penurunan atau naiknya tegangan dari beberapa bus [7].

2.6. Kurva P - V

Kurva P-V sangat berguna untuk analisis konseptual stabilitas dan tegangan untuk sistem, dimana P adalah beban total dan V adalah tegangan kritis atau perwakilan bus. P juga bisa transfer daya antara transmisi atau interkoneksi. Tegangan pada beberapa bus dapat diplot. Untuk analisis konseptual kurva P-V nyaman pada saat karakteristik beban sebagai fungsi dari tegangan. Untuk melihat

stik dari kurva P – V dapat dilihat pada Gambar 2.3





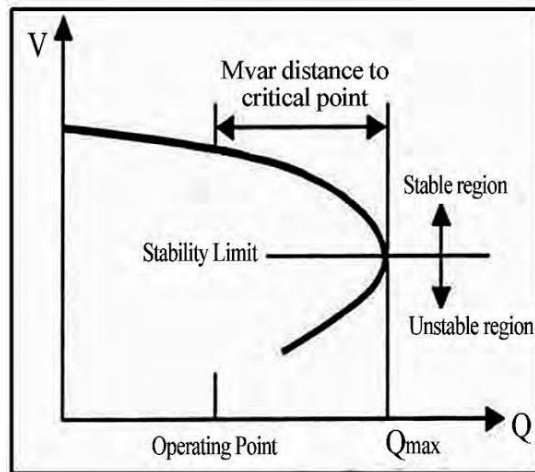
Gambar 2.3 Kurva P-V

Titik hubungan ini mengungkapkan kinerja beban memberikan tunak, untuk rangkaian stabilitas *strain line linier*, sedangkan puncak kritis titik menyatakan kondisi operasi stabil dan titik kritis mengekspresikan ketidakstabilan kondisi operasi.

2.7. Kurva Q-V

Analisis stabilitas tegangan melalui kurva Q-V ini adalah untuk melihat kondisi total banyak muatan (MVAR) sistem *strain* menuju titik kritis dan menurun. Berarti sistem kinerja dalam penyaluran daya reaktif telah melampaui kinerja sistem itu sendiri. Untuk melihat karakteristik kurva Q – V dapat dilihat pada Gambar 2.4.





Gambar 2.4 Kurva P – Q

Titik hubungan ini mengungkapkan kinerja beban memberikan *steady-state* untuk rangkaian stabilitas *strain line linier*, sedangkan atas titik kritis mengungkapkan kondisi usaha yang stabil dan di bawah titik kritis mengungkapkan kondisi operasi tidak stabil.

2.8. Penyelesaian Aliran Daya

Operasi sistem tenaga yang baik dalam kondisi *steady-state* sistem tiga fasa seimbang harus memenuhi persyaratan berikut:

- Pembangkitan menyuplai permintaan (beban) ditambah rugi-rugi
- Tegangan bus tetap mendekati *rated values*
- Generator beroperasi dalam limit daya aktif dan daya reaktif
- Saluran transmisi dan transformator tidak *overloaded*



Aliran daya adalah penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya, dan daya atau daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan

pada keadaan pengoperasian normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan terjadi di masa yang akan datang.

Studi aliran daya sangat penting, sebab dalam perencanaan suatu sistem untuk masa yang akan datang, pengoperasian yang baik dari suatu sistem tergantung pada diketahuinya efek interkoneksi dengan sistem tenaga yang lain, beban yang baru, stasiun pembangkit baru, serta saluran transmisi baru, sebelum semuanya itu dipasang.

Aliran daya di saluran listrik dapat dihitung apabila tegangan dimasing-masing bus saluran telah diketahui. Jadi masalah utama perhitungan aliran daya adalah menghitung tegangan di masing-masing bus bila sumber arus di masing-masing bus diketahui. Namun dalam saluran tenaga listrik khususnya dalam perhitungan aliran daya biasanya bukan injeksi arus yang diketahui melainkan injeksi daya. Masalahnya hanya dapat diselesaikan secara iterasi yakni secara bertahap mencari tegangan bus yang sesuai agar bersama dengan injeksi arus yang ditimbulkan tegangan yang sedemikian itu menghasilkan daya yang sama dengan daya yang diketahui.

2.9. Klasifikasi Bus

Dalam sistem tenaga setiap bus terdapat empat besaran yaitu dihubungkan dengan daya aktif (P), daya reaktif (Q), magnituda tegangan (V), dan sudut fasa (δ).

Dalam solusi aliran daya dua dari empat jumlah yang ditentukan dan dua sisanya

ditentukan melalui solusi persamaan. Bus pada sistem tenaga digolongkan dalam beberapa kategori, sebagai berikut:



1. Bus PQ

Bus PQ atau biasa disebut bus beban, yang mana komponen daya aktif P dan daya reaktif Q diketahui. Komponen tersebut diketahui untuk mendapatkan besarnya tegangan (V) dan sudut fasa (δ) melalui solusi aliran daya. Tegangan pada bus dapat diizinkan untuk berbeda dalam nilai yang ditentukan seperti +5% dan -10% dari tegangan nominal 20 kV.

2. Bus PV

Bus ini sering disebut dengan bus generator ataupun bus yang dikontrol. Besar daya aktif P dan tegangan V diketahui sesuai dengan peringkat yang ditetapkan. Hal ini diperlukan untuk mengetahui nilai daya reaktif pembangkitan (Q) dan sudut fasa (θ) bus. Daya reaktif yang diinjeksikan ke dalam bus ini bersifat variabel, artinya dapat berubah-ubah dalam batas tertentu (batas atas dan batas bawah). P-V Bus harus mempunyai sumber daya reaktif variabel, contohnya terhubung dengan generator. Dalam kenyataan, biasanya kita akan menganggap P-V Bus sebagai Generator Bus karena generator memiliki kemampuan mengubah-ubah (variabel) daya reaktifnya, untuk menjaga agar besar tegangan di busnya tetap.

3. Bus Penadah (Slack Bus)

Slack bus dalam sebuah sistem hanya satu, dimana besar dan sudut tegangan diketahui/ditentukan. Daya aktif dan reaktifnya tidak diketahui. Bus yang dipilih sebagai slack bus harus mempunyai sumber daya aktif dan reaktif. Hal ini karena

g diinjeksikan ke bus ini harus bisa “berubah-ubah” agar didapat solusi. Pilihan terbaik untuk slack bus memerlukan pengalaman dalam sistem



yang dianalisis biasanya ada lebih dari satu bus yang memiliki sumber daya aktif dan reaktif). Sifat dari sebuah solusi sering dipengaruhi oleh pemilihan slack bus. Slack bus juga sering disebut sebagai *reference bus*. Artinya, bus lain dibandingkan propertinya terhadap *reference bus* ini. Oleh sebab ini lah, salah satu tips untuk memulai perhitungan load flow, biasanya dilakukan dengan memberi nilai tegangan dan besar sudutnya dengan $1\angle 0$ p.u. , atau yang disebut sebagai *flat start*. Flat start ini dilakukan dengan asumsi, nilai tegangan dan sudut pada bus lain yang akan dicari, nilainya tidak akan jauh-jauh dari $1\angle 0$ p.u. Klasifikasi bus pada sistem tenaga listrik secara singkat diperlihatkan pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Klasifikasi Bus Pada Sistem Tenaga [9]

Tipe Bus	Besaran Yang Diketahui	Besaran Yang Tidak Diketahui
Slack Bus	$V=1; \theta=0$	P, Q
PV Bus	P, V	Q, θ
PQ Bus	P, Q	V, θ

2.10. D-STATCOM

Distribution Static Compensator (D-STATCOM) adalah sebuah sumber inverter tegangan sebagai static compensator yang digunakan untuk mengoreksi lendutan tegangan. Hubungan ke jaringan distribusi dilakukan paralel (*shunt*) disambung melalui transformator distribusi daya. D-STATCOM dapat

menyediakan variabel induktif maupun kapasitif kompensasi paralel secara dinamis pada level rating maksimum MVA. D-STATCOM mengecek bentuk



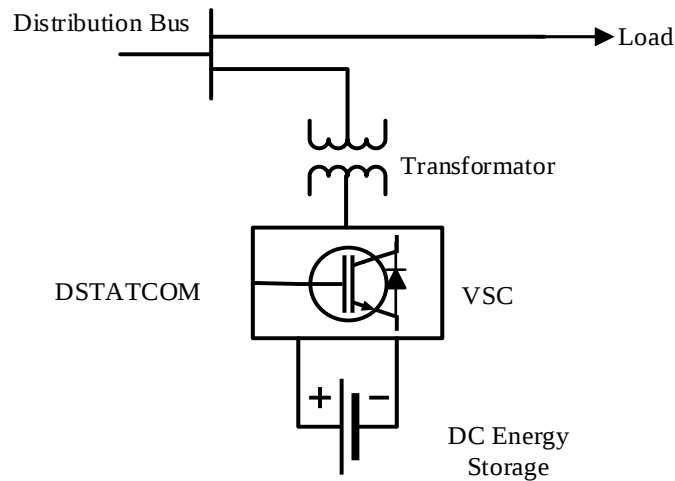
gelombang dari line dengan memperhatikan sinyal AC referensi dan karena itu dapat menyediakan jumlah arus kompensasi leading atau lagging yang benar untuk mereduksi jumlah tegangan fluktuasi.

1) Model D-STATCOM

Bentuk umum dari *Distribution Static Compensator* terdiri dari suatu gabungan dua level VSC, suatu sumber DC dan trafo penggabungan yang dihubungkan secara *shunt* dengan sistem arus bolak-balik dan unit kontrol yang terhubung. Bentuknya dapat dirancang lebih canggih menggunakan *multipulse* atau konfigurasi *multilevel* [10].

Komponen utama dari D-STATCOM terdiri dari kapasitor dc, satu atau lebih modul inverter, sebuah filter AC, sebuah transformator untuk menyelaraskan output inverter dengan tegangan line, dan sebuah kendali PWM. Dalam implementasi D-STATCOM, sebuah sumber inverter tegangan mengonversi tegangan DC ke tegangan AC tiga fasa dan dihubungkan ke line AC melewati ikatan reaktor dan kapasitor. Gambar 2.5 menunjukkan diagram blok dari D-STATCOM.





Gambar 2.5 Diagram Blok D-STATCOM

Komponen D-STATCOM terdiri dari tiga komponen utama, yaitu:

- IGBT atau GTO berbasis inverter DC ke AC: Inverter ini digunakan untuk membuat arus reaktif leading atau lagging pada gelombang output tegangan yang dikontrol dalam besar dan fasa berdasarkan kompensasi yang dibutuhkan.
- Filter L-C : Filter LC digunakan untuk mereduksi harmonik dan mencocokkan impedansi output inverter untuk mengaktifkan inverter multi-paralel untuk membagi arus. Filter LC dipilih karena keselarasan dengan tipe dari sistem dan harmonik yang terjadi pada output inverter.
- Kontrol Pengendali (*Control Block*) : Kontrol pengendali digunakan pada saat switch modul *Pure Wave* D-STATCOM diperlukan. Kontrol pengendali dapat mengendalikan peralatan eksternal seperti *switch* mekanik kapasitor bank.



2) Pengaturan Tegangan D-STACOM

D-STATCOM adalah *Voltage-Source Inverter* (VSI), yang mengubah tegangan input DC kedalam tegangan output AC untuk mengkompensasi daya aktif dan reaktif yang diperlukan oleh sistem. Prinsip operasi dasar pembangkit daya reaktif dengan VSI adalah mirip dengan mesin sinkron konvensional. Arus reaktif yang ditarik oleh tegangan kompensator sinkron tergantung pada besarnya tegangan sistem V , yakni konverter V_0 dan reaktansi rangkaian keseluruhan (reaktansi bocor transformator plus reaktansi kopling trafo) X :

$$I = \frac{V - V_0}{X} \quad (2.24)$$

Pertukaran daya reaktif Q dinyatakan dengan :

$$Q = \frac{1 - \frac{V_0}{V}}{X} V^2 \quad (2.25)$$

Maka, penentuan KVAR dari D-STATCOM dilakukan dengan rumus :

$$\Delta Q = \Delta V * S_{sc} \quad (2.26)$$

Dimana :

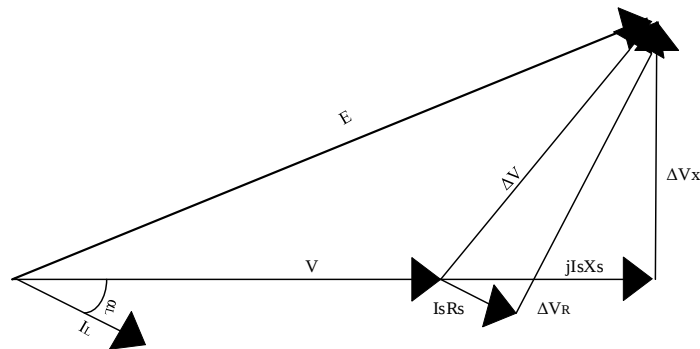
ΔQ = Kapasitas Kompensator

ΔV = Fluktuasi Tegangan

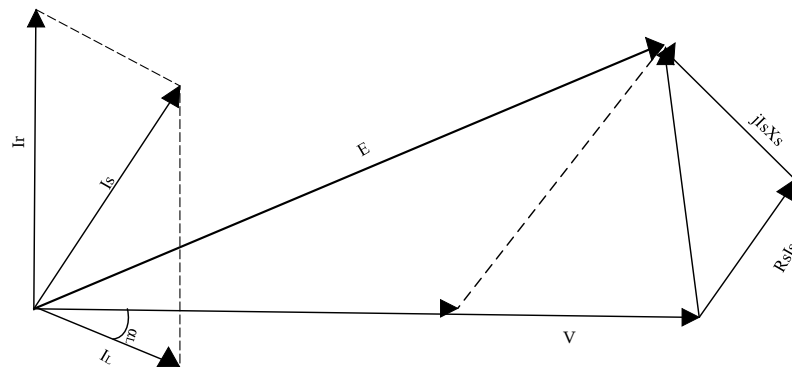
S_{sc} = KVA Hubung Singkat [11]

Vektor perubahan tegangan sebelum dikompensasi dan setelah dikompensasi dapat dilihat pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7





Gambar 2.6 Vektor Sebelum Dikompensasi



Gambar 2.7 Vektor Setelah Dikompensasi

3) Prinsip Operasi Dasar

Prinsip kerja dasar dari DSATCOM sama dengan dengan mesin sinkron. Mesin sinkron akan menyediakan arus lagging ketika *under* eksitasi dan arus leading ketika *over* eksitasi. D-STATCOM dapat menghasilkan dan menyerap daya reaktif sama dengan dengan mesin sinkron dan dapat menukar daya real jika disediakan dengan sebuah sumber DC eksternal.

1. D-STATCOM menukar daya reaktif: Dilakukan jika tegangan output dari

arter sumber tegangan lebih besar dari tegangan sistem. D-STATCOM bekerja sebagai reaktansi induktif sehingga peralatan menghasilkan daya



reaktif kapasitif (arus *leading* bergerak dari D-STATCOM ke sistem) dan jika tegangan output dari konverter lebih kecil dari tegangan sistem maka D-STATCOM akan bekerja sebagai reaktansi kapasitif sehingga peralatan menyerap daya reaktif induktif (arus *lagging* bergerak dari D-STATCOM ke sistem).

2. D-STATCOM menukar daya real jika perangkat switch tidak kehilangan daya real kurang dari yang dibutuhkan kapasitor DC untuk *switching*.

4) Perbedaan D-STATCOM, *Fixed Capacitor*, dan SVC

D-STATCOM adalah regulator tegangan yang berbasis FACTS (*Flexible AC Transmission System*) yang memiliki respon sangat cepat yaitu <10 ms. D-STATCOM dapat mengkompensasi lonjatan tegangan hingga rating yang tinggi, selain itu juga memiliki kemampuan menyerap dan menghasilkan daya reaktif sesuai yang dibutuhkan sistem karena dilengkapi dengan induktor dan kapasitor. Sifatnya yang *flexible* menguntungkan untuk sistem karena nilai daya reaktif yang dihasilkan ataupun yang diserap sesuai dengan kebutuhan sistem. D-STATCOM juga dilengkapi dengan transformator dan kontrol daya sehingga perlu lahan yang cukup besar untuk pemasangannya [12].

Fixed Capacitor adalah regulator tegangan yang tidak berbasis FACTS hanya dapat menghasilkan daya reaktif untuk sistem. Nilai *fixed capacitor* yang berarti daya reaktif yang tersalurkan ke sistem tidak sesuai dengan kebutuhan sistem dan mungkin terjadinya *over voltage*.

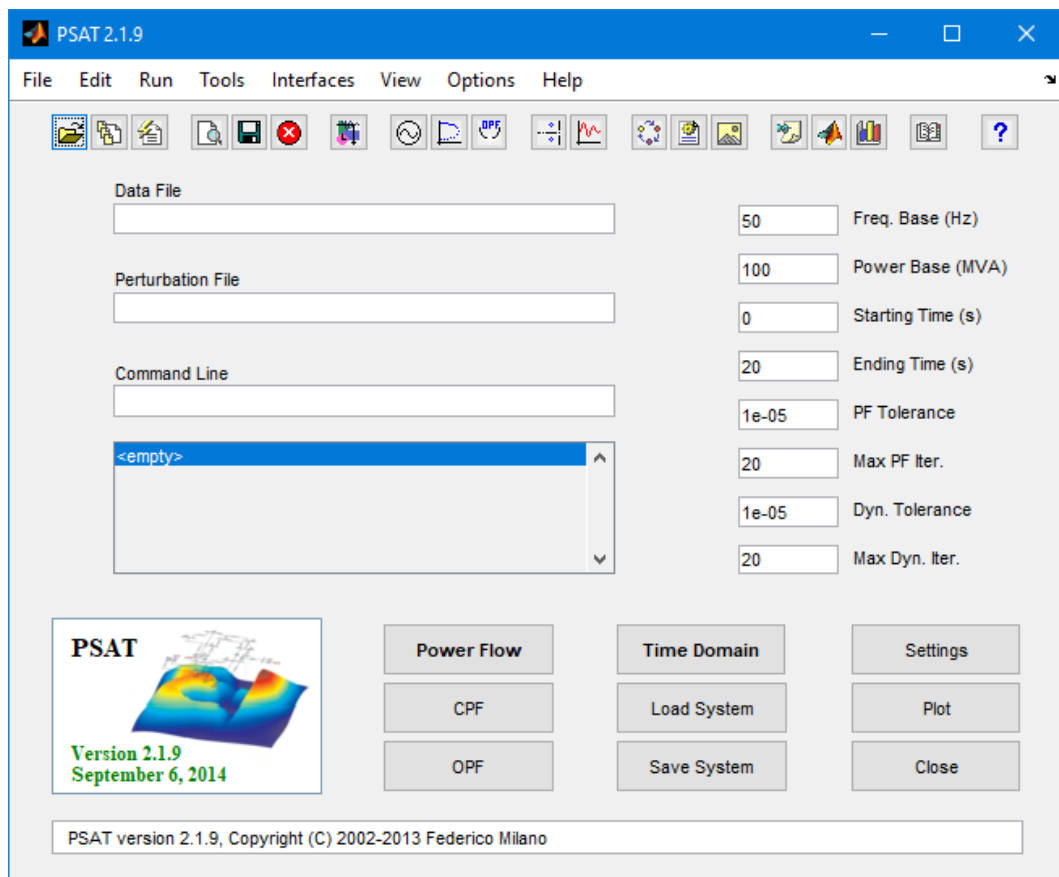


Static VAR Compensator adalah salah satu perangkat FACTS yang dapat menghasilkan daya reaktif dan menyerap daya reaktif. SVC termasuk kompensator fast acting reactive power untuk jaringan transmisi tegangan tinggi [10].

2.11 *Power System Analysis Toolbox (PSAT)*

PSAT adalah *toolbox* pada Matlab yang digunakan untuk menganalisis dan mengendalikan sistem tenaga listrik. Kelebihan *toolbox* PSAT adalah terdapat beberapa analisis yakni *Power Flow*, *Continuation Power Flow (CPF)*, *Small Signal Stability* dan *Time Domain Simulation*. Kelebihan PSAT lainnya adalah dapat melakukan analisis kontrol statis dan dinamis, semua operasi dapat dinilai dengan menggunakan *Graphical User Interfaces (GUIs)*, perpustakaan berbasis Simulink menyediakan alat yang ramah pengguna untuk desain jaringan, dan dapat dilakukan simulasi aliran daya lanjutan [13]. PSAT sudah digunakan lebih 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 yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 [14]





Gambar 2.8 PSAT 2.1.9

