



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENGONTROLAN POWER FLOW SALURAN PADA SISTEM JAMALI
(JAWA-MADURA-BALI) DENGAN MENGGUNAKAN STATCOM**

Anugerah Akbar Setiyawan
NRP 0711154000056

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENGONTROLAN POWER FLOW SALURAN PADA SISTEM JAMALI
(JAWA-MADURA-BALI) DENGAN MENGGUNAKAN STATCOM**

Anugerah Akbar Setiyawan
NRP 0711154000056

Dosen Pembimbing

Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan



Final Project - EE 184801

CONTROLLING LINE POWER FLOW IN JAMALI (JAWA-MADURA-BALI) SYSTEM USING STATCOM

Anugerah Akbar Setiyawan
NRP 0711154000056

Supervisor

Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Halaman ini sengaja dikosongkan

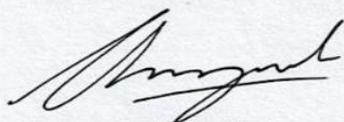
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Pengontrolan Power Flow Saluran pada Sistem JAMALI (Jawa-Madura-Bali) dengan Menggunakan STATCOM”** adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Mei 2019



Anugerah Akbar Setiyawan
0711154000056

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENGONTROLAN POWE FLOW SALURAN PADA
SISTEM JAMALI (JAWA-MADURA-BALI) DENGAN
MENGUNAKAN STATCOM**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 194907151974121001

Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
NIP. 196509011991032002



Halaman ini sengaja dikosongkan

Pengontrolan Power Flow Saluran pada Sistem JAMALI (Jawa-Madura-Bali) dengan menggunakan STATCOM

Nama Mahasiswa : Anugerah Akbar Setiyawan
NRP : 0711154000056
Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
NIP : 194907151974121001
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT
NIP : 196509011991032002

ABSTRAK

Beberapa penelitian mengenai *FACTS devices* sebagai solusi dari berbagai permasalahan jaringan transmisi telah banyak dilakukan. Pemasangan *FACTS devices*, termasuk salah satunya *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*, pada sistem memiliki dampak positif pada sistem tersebut. Salah satu dampak positif dari pemasangan *FACTS* adalah kemampuan *FACTS* untuk dapat melakukan *controlling power flow* saluran pada sistem. *STATCOM* sendiri adalah seperangkat peralatan elektronika daya yang berbasis *Voltage Source Converter (VSC)*. *STATCOM* akan disimulasikan penerapannya pada sistem transmisi Jawa-Madura-Bali (*JAMALI*). Sistem *JAMALI* sendiri merupakan sistem yang dianggap sebagai *backbone* dari sistem transmisi listrik yang ada di Indonesia. Oleh karena itu simulasi dilakukan dengan melihat potensi dari *FACTS* apabila nantinya diaplikasikan. Pada Tugas Akhir ini simulasi dilakukan dengan menggunakan *software PSS/E 33* yang kemudian hasil dari simulasi tersebut akan dianalisis. Tujuan dari tugas akhir ini adalah mensimulasikan kemungkinan pemasangan *FACTS Devices*, dalam hal ini *STATCOM*, pada sistem *JAMALI* dan mengetahui dampak dari pemasangan pada sistem *JAMALI* serta analisisnya.

Kata Kunci : Aliran Daya, *FACTS Devices*, Kontrol Aliran Daya, *Static Synchronous Compensator*

Halaman ini sengaja dikosongkan

Controlling Line Power Flow in JAMALI (Jawa-Madura-Bali) System Using STATCOM

Name : Anugerah Akbar Setiyawan
NRP : 0711144000056
Supervisor I : Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D
NIP : 194907151974121001
Supervisor II : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT
NIP : 196509011991032002

ABSTRACT

Several studies on FACTS devices as a solution to various transmission network problems have been carried out. Installation of FACTS devices including Static Synchronous Compensator (STATCOM), on the system has a positive impact on the system. One of the positive effects of installing FACTS is the ability of FACTS to be able to control the power flow channels on the system. STATCOM itself is a set of power electronics equipment based on Voltage Source Converter (VSC). STATCOM will simulate its application to the Java-Madura-Bali (JAMALI) transmission system. The JAMALI system itself is a system that is considered as the backbone of the electricity transmission system in Indonesia. Therefore the simulation is done by looking at the potential of FACTS when it is later applied. In this Final Project the simulation is carried out using PSS / E 33 software, then the results of the simulation will be analyzed. The purpose of this final project is to simulate the possibility of installing FACTS Devices, in this case STATCOM, on the JAMALI system and find out the impact of the installation on the JAMALI system and its analysis

Keywords : Power Flow, FACTS Devices, Power Flow Control,
Static Synchronous Compensator

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Pengontrolan *Power Flow* Saluran pada Sistem JAMALI (Jawa-Madura-Bali) dengan Menggunakan STATCOM”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu, Ayah dan kakak penulis di rumah yang selalu mendoakan, mendukung dan memberikan semangat kepada penulis baik dalam keadaan senang ataupun susah.
3. Prof. Ir. H. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D dan Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Teman-teman asisten, trainee dan calon trainee serta member lab PSSL B103 yang telah menciptakan dan memberikan dukungan, penjelasan, dan juga suasana kondusif dalam menyelesaikan tugas akhir.
5. Seluruh asisten lab PSSL B103 yang memberi dukungan dan bantuan pada pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman dekat penulis dari grup Cukok Dinding yang telah menjadi kawan dan lawan dalam menjalani perkuliahan selama 4 tahun.
7. Teman-teman Tim Event EVOLTY 2018 yang mengisi hari-hari tahun ketiga penulis dan membantu dalam menyukseskan acara ketika penulis menjadi Ketua Tim Event EVOLTY 2018.

8. Teman-teman Tim SC Kaderisasi HIMATEKTRO 2016/2017 yang mengisi tahun kedua penulis.
9. Teman-teman SOLASI yang tetap selalu satu walaupun setelah adanya perpisahan.
10. Seluruh teman-teman e55 yang tidak bisa saya sebutkan namanya satu persatu, terima kasih atas cerita dan perhatiannya selama ini.
11. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Elektro yang telah berjasa selama empat tahun membantu penulis selama kuliah dan telah memberikan banyak ilmu yang bermanfaat.

Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi mahasiswa maupun peneliti. Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan, untuk itu kritik dan saran diharapkan untuk penyempurnaan tugas akhir ini.

Surabaya, Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
ABSTRAK.....	xi
ABSTRACT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI.....	xvii
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan.....	2
1.4 Batasan.....	3
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB II.....	7
PENGONTROLAN <i>POWER FLOW</i> PADA SALURAN	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.2 Analisis Aliran Daya	15
2.3 Analisis Stabilitas Sistem.....	16
2.4 <i>Static Synchronous Compensator (STATCOM)</i>	22
2.5 Standarisasi Tegangan dan Frekuensi	24
BAB III.....	27
PEMASANGAN STATCOM PADA SISTEM JAMALI UNTUK PENGONTROLAN <i>POWER FLOW</i> PADA SALURAN	27
1	27
3.1 Diagram Alir Metode Analisis Pemasangan STATCOM pada sistem JAMALI.....	27
3.2 Penjelasan Diagram Alir Metode Analisis Pemasangan STATCOM pada Sistem JAMALI	28
3.3 Sistem Kelistrikan JAMALI (Jawa-Madura-Bali) ...	29

3.4	STATCOM dalam Sistem	36
BAB IV	39	
SIMULASI HASIL DAN PEMBAHASAN	39	
4.1	Hasil simulasi <i>Power Flow</i>	39
4.2	Studi Kasus	41
4.3	Hasil dan Analisis Dampak dari Pemasangan STATCOM	47
BAB V	57	
PENUTUP	57	
5.1	Kesimpulan	57
5.2	Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	59	
LAMPIRAN	61	
	Lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow	61
RIWAYAT HIDUP	75	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Skema Pembangkitan PLTU	8
Gambar 2. 2 Pembagian Zona Tegangan pada Transmisi	9
Gambar 2. 3 Sirkuit Ekivalen dari Saluran Transmisi Pendek	10
Gambar 2. 4 Sirkuit Ekivalen dari Transmisi Menengah π	11
Gambar 2. 5 Sirkuit Ekivalen dari Transmisi Menengah T	12
Gambar 2. 6 Sirkuit Ekivalen Saluran Panjang	13
Gambar 2. 7 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	18
Gambar 2. 8 Ilustrasi Kestabilan Frekuensi	20
Gambar 2. 12 Rangkaian Ekivalen STATCOM	23
Gambar 2. 11 Konfigurasi STATCOM	23
Gambar 3. 1 Diagram alir skema penelitian	27
Gambar 3. 2 Single Line Diagram (SLD) JAMALI 500 kV	30
Gambar 3. 3 Diagram Blok STATCOM model PSS/E 33 (CSTCNT)	36
Gambar 4. 1 Saluran Bus Tanjung Jati- Bus Ungaran	42
Gambar 4. 2 Simulasi Keadaan Line Trip pada Saluran Tj Jati- Ungaran Pada Bus Genload Tanjung Jati	43
Gambar 4. 3 Simulasi Keadaan Line Trip pada Saluran Tj Pedan- Ungaran Pada Bus Genload Tanjung Jati	45
Gambar 4. 4 Letak Pemasangan STATCOM pada Saluran	47
Gambar 4. 5 Grafik Dampak STATCOM pada Pemulihan Tegangan di Bus Genload Tjjati	48
Gambar 4. 6 Dampak STATCOM terhadap Kestabilan Frekuensi pada Bus Genload Tj Jati	50
Gambar 4. 7 Grafik Dampak STATCOM pada Pemulihan Tegangan di Bus Tanjung Jati	51
Gambar 4. 8 Dampak STATCOM terhadap Kestabilan Frekuensi pada Bus Tanjung Jati	53
Gambar 4. 9 Grafik Sudut Rotor Sebelum Pemasangan STATCOM	54
Gambar 4. 10 Grafik Sudut Rotor Sesudah Pemasangan STATCOM	55

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Batas Kerja Tegangan Sesuai Level Tegangan.....	25
Tabel 3. 1 Data beban maksimum dan pembangkitan Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV.....	31
Tabel 3. 2 Data beban maksimum dan pembangkitan Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV lanjutan.....	32
Tabel 3. 3 Data Parameter Pemodelan Dynamic GENROU.....	34
Tabel 3. 4 Data Parameter Pemodelan Dynamic GENROU lanjutan	35
Tabel 3. 5 Data Parameter Pemodelan Dynamic GENSAL	35
Tabel 3. 6 Data Parameter Pemodelan Dynamic GENSAL lanjutan	36
Tabel 3. 7 Data Parameter Pemodelan STATCOM (CSTCNT).....	37
Tabel 4. 1 Hasil Power Flow (Tegangan, Sudut Tegangan, Daya Saluran) pada Bus Ungaran dan Tanjung Jati.....	40
Tabel 4. 2 Perbandingan Kondisi Saluran ketika Line Trip pada Saluran Bus Tj Jati-Ungaran dan Pedan-Ungaran	46
Tabel 4. 3 Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah STATCOM Terpasang pada Sistem di Bus Genload Tj Jati	49
Tabel 4. 4 Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah STATCOM Terpasang pada Sistem Terhadap Bus Tanjung Jati	52

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada sistem transmisi terkini, sistem semakin berkembang dan terinterkoneksi sehingga sistem menjadi semakin kompleks. Oleh karena itu adalah sebuah kebutuhan bagi sistem transmisi untuk dapat meningkatkan pemanfaatan tenaga listrik dengan tetap mempertahankan keamanan dan stabilitas sistem. Salah satu cara agar pemanfaatan tenaga listrik dapat dilakukan dengan melakukan pengontrolan aliran daya pada saluran. Pengontrolan aliran daya pada saluran memungkinkan pengguna untuk dapat mengontrol sistem sesuai dengan kondisi yang diinginkan. Aliran daya saluran perlu dikontrol untuk mencapai pemanfaatan optimal kapasitas saluran transmisi.[1] Pengontrolan aliran daya dapat dilihat melalui hasil analisis *power flow* dimana analisis tersebut dilakukan ketika sistem dalam keadaan *steady state*. Sebuah permasalahan baru lalu muncul ketika pengontrolan aliran daya pada sistem dibutuhkan, yaitu peralatan yang mampu mengontrol sistem dengan cepat dan tepat.

Peralatan yang mampu melakukan kontrol sistem dengan cepat dan tepat adalah *Flexible AC Transmission System (FACTS) Devices*. FACTS sangat intensif untuk menjaga stabilitas tegangan pada jalur transmisi untuk memanipulasi aliran daya.[2] Sebelum adanya FACTS sendiri, sebenarnya untuk kebutuhan akan kontrol pada aliran daya sendiri telah ada solusi yaitu berupa kapasitor shunt dan seri yang memiliki switch mekanik dan juga generator sinkron.[3] Tetapi seiring dengan sistem yang semakin kompleks maka diperlukan pula peralatan yang dapat melakukan pengontrolan dalam waktu yang singkat. Penerapan dari FACTS di berbagai sistem transmisi di dunia telah dilakukan dan memberikan hasil yang memuaskan dan sesuai dengan yang diinginkan. *FACTS Devices* dibagi menjadi 2 jenis, yaitu FACTS yang terhubung secara shunt dan seri. Dari kedua jenis itu FACTS telah banyak dikembangkan, salah satu bentuk pengembangannya adalah dengan terciptanya STATCOM.

Static Synchronous Compensator (STATCOM) adalah salah satu *FACTS Devices* dimana peralatan tersebut merupakan bentuk pengembangan dari *Static VAR Compensator (SVC)*. STATCOM mampu untuk melakukan kontrol dengan menggunakan *switching*

cepat dan pengaturan pada sudut penyalan dari thyristor setelah Potential Transformer (PT) melakukan pengukuran dan mengirim data ke kontroler.

Sistem transmisi JAMALI (Jawa-Bali-Madura) sebagai sistem transmisi utama di Indonesia tentunya memiliki peran yang vital. Sistem tersebut mengkoneksikan pembangkit-pembangkit yang terletak di sepanjang Pulau Jawa, Madura, dan Bali. Oleh karena peran sistem transmisi ini yang sangat vital dan memiliki tingkat kekompleksan yang tinggi, maka pengaplikasian FACTS pada sistem tersebut akan memberikan dampak yang besar pada sistem. Tugas akhir ini memiliki fokus pada kemungkinan pemasangan *FACTS Devices*, dalam hal ini STATCOM, pada Sistem Transmisi JAMALI tersebut karena melihat sistem saat ini yang masih belum menggunakan *FACTS Devices* dalam pengendalian sistem tenaga listrik yang saat ini beroperasi. Sehingga diharapkan hasil dari simulasi pemasangan STATCOM pada sistem dapat menunjukkan peningkatan pada sistem setelah dilakukan pemasangan.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang akan dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kondisi eksisting sistem transmisi JAMALI.
2. Analisis kontrol STATCOM terhadap sistem JAMALI.
3. Membandingkan kondisi sistem pada saat sebelum dan sesudah dilakukan simulasi pemasangan STATCOM pada sistem transmisi JAMALI.

1.3 Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk:

1. Mendapatkan hasil kondisi eksisting dari sistem transmisi JAMALI
2. Memperoleh hasil kondisi sistem setelah dilakukan pemasangan STATCOM pada sistem transmisi JAMALI.
3. Memperoleh hasil perbandingan dari analisis kondisi sebelum dan sesudah pemasangan STATCOM pada sistem transmisi JAMALI.

1.4 Batasan

Dalam menyelesaikan permasalahan pada tugas akhir ini terdapat batasan yang diperlukan, yaitu:

1. Simulasi dan analisis menggunakan perangkat lunak PSS/E 33.
2. Jaringan transmisi JAMALI yang dilakukan analisis adalah jaringan JAMALI 500 kV.
3. Perangkat FACTS yang digunakan adalah STATCOM.

1.5 Metodologi

1. Studi Literatur
Studi literatur diperlukan untuk memperkuat teori penunjang dalam pengerjaan tugas akhir. Teori penunjang yang diperlukan antara lain adalah dasar-dasar transmisi sistem tenaga listrik, kontrol aliran daya, dan Static Synchronous Compensator (STATCOM). Studi literatur diperoleh dari membaca *paper*, artikel ilmiah, jurnal, dan berbagai buku yang relevan dengan topik tugas akhir ini.
2. Pemodelan Sistem
Setelah seluruh data sudah terkumpul dan studi literatur dilaksanakan, maka akan dilakukan pemodelan sistem Transmisi JAMALI (Jawa-Madura-Bali) dengan *software* PSS/E 33.
3. Pemodelan STATCOM pada sistem
Pemodelan STATCOM yang dilakukan menggunakan *software* PSS/E 33. Setelah dilakukan pemodelan, akan dilakukan simulasi untuk mendapatkan hasil sistem sebelum pengaplikasian STATCOM dan sesudah STATCOM diaplikasikan.
4. Simulasi
Pemodelan dari keseluruhan sistem kemudian akan disimulasi dengan menggunakan *software* PSS/E 33. Simulasi power flow dari sistem dilakukan terlebih dahulu. Kemudian dilanjutkan dengan simulasi dynamic dari sistem yang telah dimodelkan sebelumnya.
5. Implementasi
Dari luaran simulasi dari sistem yang telah dimodelkan, STATCOM kemudian akan dimasukkan kedalam sistem. Setelah itu dilakukan kembali simulasi untuk mendapatkan

hasil setelah pemasangan dari STATCOM. Setelah didapatkan kedua hasil simulasi maka dapat dilakukan analisis dengan melihat hasil eksisting sistem yang kemudian dibandingkan dengan setelah STATCOM terpasang.

6. Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan implementasi dapat di tarik kesimpulan hasil dari penelitian yang telah dijalankan.

7. Penyusunan Laporan

Pembuatan laporan dilakukan setelah seluruh tahap penelitian telah dilaksanakan yang selanjutnya kesimpulan dan hasil dari seluruh tahapan penelitian ditulis dalam laporan.

1.6 Sistematika Penulisan

BAB I Pendahuluan.

Pada bab ini dijelaskan mengenai latar belakang permasalahan dari pengerjaan tugas akhir, tujuan, permasalahan, batasan masalah, metodologi penelitian, sistematika penulisan dan relevansi pengerjaan tugas akhir.

BAB II Sistem Tenaga Listrik, Analisis Aliran Daya, Analisis Stabilitas Sistem, *Static Synchronous Compensator* (STATCOM). Sebagai obyek kajian pada tugas akhir ini.

BAB III Perancangan dan Pemodelan
Bab ini membahas mengenai diagram alir dan metode penelitian yang digunakan dan pemodelan dari sistem yang digunakan yang terdiri atas sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (JAMALI) 500 kV, dan pemodelan STATCOM.

BAB IV Simulasi dan Analisis.
Bab ini berisi mengenai hasil simulasi dan analisis dari sistem eksisting, hasil dan simulasi dan analisis sistem setelah pemasangan STATCOM, dan hasil rekap dari sistem.

BAB V Penutup.

Pada tahap akhir ini memberikan penjelasan mengenai kesimpulan dan saran dari hasil penelitian pada tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Sebagai masukan bagi Sistem JAMALI (Jawa-Madura-Bali) apabila ingin mengaplikasikan FACTS pada sistem.
2. Sebagai referensi bagi peneliti lain yang ingin melakukan penelitian tentang penggunaan FACTS pada sistem.
3. Menjadi sebuah referensi untuk mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian dengan topik mengenai *Flexible AC Transmission System* (FACTS).

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

PENGONTROLAN *POWER FLOW* PADA SALURAN

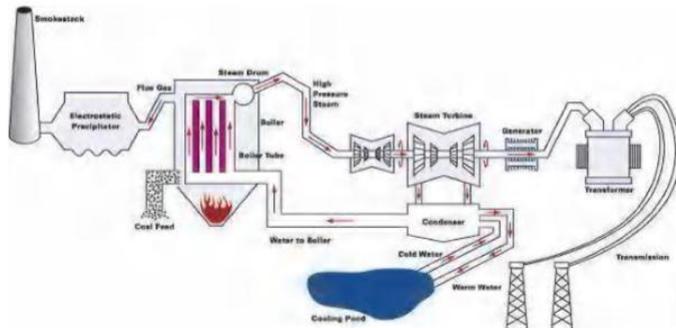
2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah sebuah jaringan yang diperlukan dalam proses untuk listrik dari dibangkitkan hingga akhirnya terdistribusi dan dapat digunakan oleh masyarakat. Pada sistem ketenagalistikan saat ini mayoritas bergantung pada sistem AC 3-fasa, termasuk dengan sistem tenaga listrik yang digunakan di Indonesia. Sistem tersebut telah digunakan sejak lebih dari 100 tahun yang lalu dan saat ini sistem tenaga listrik telah menjadi kebutuhan inti dari kehidupan masyarakat modern.[4] Sistem tenaga listrik sendiri dapat dibagi menjadi 4 bagian utama yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem distribusi, dan beban. Sistem tenaga listrik juga meliputi seluruh peralatan yang digunakan atau beroperasi dalam seluruh proses yang terjadi sejak listrik terbangkitkan hingga digunakan oleh masyarakat.

2.1.1 Sistem Pembangkitan

Sistem Pembangkitan pada Sistem Tenaga Listrik adalah sebuah rangkaian peralatan yang digunakan dalam proses pembangkitan energi listrik oleh generator. Pada umumnya di proses ini bahan bakar (batubara, air, nuklir, dll.) akan dikonversi untuk menghasilkan energi listrik. Bahan bakar akan digunakan untuk menggerakkan turbin pada generator sehingga energi listrik dapat terbangkitkan.

Turbin mengubah energi potensial dan kinetik dari fluida bergerak (cair atau gas) menjadi energi mekanik. Dalam generator turbin, fluida bergerak seperti air, uap, gas pembakaran, atau udara mendorong serangkaian bilah yang dipasang pada poros, yang memutar poros yang terhubung ke generator. Generator, pada gilirannya, mengubah energi mekanik menjadi energi listrik berdasarkan hubungan antara magnetisme dan listrik.



Gambar 2. 1 Skema Pembangkitan PLTU

Sebagai contoh adalah skema pembangkitan pada PLTU. Prinsip kerja PLTU adalah sebagai berikut:

1. Air dalam ketel uap dipanaskan hingga menjadi uap dengan suhu dan tekanan yang tinggi.
2. Uap tersebut kemudian dialirkan menuju turbin uap dan digunakan untuk memutar turbin.
3. Uap keluaran dari turbin lalu dialirkan menuju kondensator untuk didinginkan kembali.
4. Air dari proses tersebut digunakan kembali untuk diuapkan.

2.1.2 Sistem Transmisi

Sistem transmisi adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang memiliki fungsi utama untuk mengirim daya yang dihasilkan pada sistem pembangkitan untuk diteruskan menuju sistem distribusi. Sistem transmisi memungkinkan transfer daya listrik antar tempat yang letaknya berjauhan. Manfaat yang didapat adalah sistem transmisi dapat menghubungkan *plant* pembangkit yang terletak jauh dari pemukiman dengan sistem distribusi pada daerah industri dan perkotaan, termasuk juga dengan *plant* energi baru terbarukan yang letaknya menyesuaikan dengan sumber energi alternatif yang digunakan.[5]

Tegangan yang biasa digunakan pada sistem transmisi tenaga listrik adalah tegangan tinggi dan tegangan ekstra tinggi dengan maksud untuk mengurangi rugi-rugi daya yang muncul akibat arus yang terlalu besar pada kawat penghantar. dan juga untuk menjaga stabilitas tegangan .



Gambar 2. 2 Pembagian Zona Tegangan pada Transmisi

Dengan keterangan:

- A: Tegangan rendah / menengah
- B: Tegangan tinggi / ekstra tinggi
- C: Tegangan menengah / rendah

Saluran transmisi mengirimkan tenaga listrik yang berasal dari pembangkit-pembangkit dengan menggunakan saluran tegangan tinggi / saluran tegangan ekstra tinggi 150 / 500 kV. Untuk melaksanakan proses tersebut maka dibutuhkan transformator step-up (penaik tegangan) untuk mentransmisikan daya dari pembangkit (tegangan rendah) dan juga transformator step-down (penurun tegangan) agar dapat didistribusikan ke pusat beban.

Pada sistem transmisi, bentuk dari saluran transmisi dapat berupa:

1. Saluran Udara (*Overhead Line*)

Tenaga listrik disalurkan melalui kawat-kawat bergantung yang dihubungkan antar tiang-tiang atau menara transmisi dengan isolator sebagai perantara. Saluran ini memiliki keunggulan pada biaya instalasi yang murah, cara penyambungan yang mudah, dan mudah ketika perlu melakukan deteksi gangguan. Untuk kelemahan dari saluran ini adalah perlunya ruang yang banyak dalam instalasinya dan relatif lebih mudah terjadi gangguan yang disebabkan faktor eksternal.

2. Saluran Bawah Tanah (*Underground Line*)

Tenaga listrik disalurkan melalui kawat yang berada di bawah tanah. Keunggulan dari saluran ini adalah ruang yang diperlukan lebih sedikit dan tidak terpengaruh perubahan cuaca. Kelemahan dari saluran ini adalah biaya

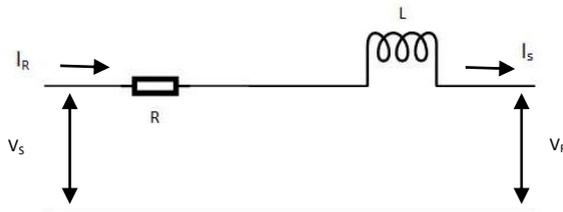
investasi yang cukup mahal, penyambungan yang perlu keahlian khusus serta sulitnya melakukan deteksi gangguan.

Panjang dari saluran transmisi sangat mempengaruhi parameter saluran transmisi sehingga akan mempengaruhi nilai tegangan bus dan daya yang dapat mengalir melalui saluran tersebut. Pemodelan dari saluran transmisi pada sistem tenaga listrik dibedakan menjadi 3 tipe saluran dimana pemodelan tersebut mengacu pada panjang dari saluran transmisi. Berikut adalah tipe saluran transmisi:

1. Saluran transmisi pendek
2. Saluran transmisi menengah
3. Saluran transmisi panjang

2.1.2.1 Saluran Transmisi Pendek

Saluran transmisi pendek adalah saluran transmisi yang memiliki panjang kurang dari atau sama dengan 100 km dengan tegangan pada saluran kurang dari 69 kV, pada saluran pendek ini nilai dari kapasitansi saluran dapat diabaikan. Rangkaian ekuivalen dari saluran transmisi pendek dapat dilihat pada gambar. I_s dan I_r merepresentasikan nilai arus pada ujung bagian pengirim dan ujung bagian penerima, sedangkan untuk V_s dan V_r adalah nilai tegangan saluran terhadap netral pada ujung bagian pengirim dan ujung bagian penerima. Rangkaian ekuivalen tersebut dapat diselesaikan seperti halnya dengan rangkaian AC seri yang sederhana. Pada rangkaian tersebut tidak terdapat cabang parallel, sehingga arus pada ujung pengirim dan penerima akan sama nilainya dan parameter saluran terpusat.



Gambar 2. 3 Sirkuit Ekuivalen dari Saluran Transmisi Pendek

Dari gambar 2. diperoleh:

$$I_S = I = I_R \quad (2.1)$$

$$V_S = V_R + I R \quad (2.2)$$

Dimana,

$$Z = R + j\omega L ; \text{ per satuan panjang}$$

Persamaan umum saluran:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (2.3)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (2.4)$$

Dimana: $A = D = 1$; $B = Z$; $C = 0$

Maka didapatkan:

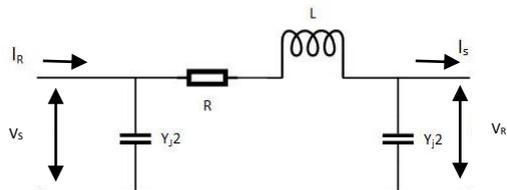
$$V_S = V_R + ZI_R \quad (2.5)$$

$$I_S = I_R \quad (2.6)$$

2.1.2.2 Saluran Transmisi Menengah

Saluran transmisi menengah memiliki panjang 80-50 km. Saluran menengah dapat direpresentasikan dengan R dan L sebagai parameter terpusat, dengan setengah dari kapasitansi ke netral dari saluran terpusat dari masing-masing ujung rangkaian ekuivalen. Pada saluran menengah kapasitansi dapat difokuskan pada satu titik, dimana membagi saluran menengah menjadi 2 model yaitu model π dan model T.

1. Model π



Gambar 2. 4 Sirkuit Ekuivalen dari Transmisi Menengah π

$Y = j\omega C$ per satuan panjang

$$V_S = V_R + I_R \quad (2.7)$$

$$I_S = \frac{1}{2} V_R + I_R \quad (2.8)$$

Dan

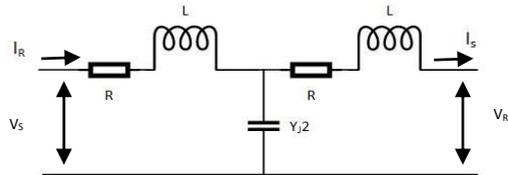
$$I_S = I + V_S \cdot \frac{1}{2} Y \quad (2.9)$$

Diperoleh:

$$V_S = (I + \frac{1}{2} YZ) V_R + ZI_R \quad (2.10)$$

$$I_S = Y (I + \frac{1}{4} YZ) V_R + (I + \frac{1}{2} YZ) I_R \quad (2.11)$$

2. Model T



Gambar 2. 5 Sirkuit Ekuivalen dari Transmisi Menengah T

Dari gambar diperoleh:

$Y = j\omega C$ per satuan panjang

$$V_S = V_C + ZI_S \quad (2.12)$$

$$V_C = V_R + ZI_R \quad (2.13)$$

$$I_S = YV_C + I_R \quad (2.14)$$

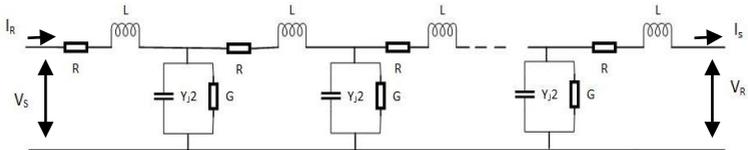
Maka diperoleh

$$V_S = (I + \frac{1}{2} YZ) V_R + Z (I + \frac{1}{4} YZ) I_R \quad (2.15)$$

$$I_S = YV_R + (I + \frac{1}{2} YZ) I_R \quad (2.16)$$

2.1.2.2 Saluran Transmisi Panjang

Persamaan umum yang digunakan untuk merepresentasikan saluran transmisi panjang yang menghubungkan tegangan dan arus pada saluran transmisi perlu memperhitungkan kondisi dari empat parameter yaitu R, L, C, dan G yang tersebar merata pada seluruh bagian dari saluran. Pada saluran transmisi panjang yang memiliki panjang lebih dari 240 km diperlukan adanya perhitungan khusus dengan menggunakan konstanta yang tersebar demi mendapat hasil dengan tingkat ketelitian tinggi. Meskipun pada kondisi tertentu representasi sistem dengan parameter terpusat juga digunakan untuk saluran sepanjang 320 km.



Gambar 2. 6 Sirkuit Ekuivalen Saluran Panjang

Berlaku hubungan:

$$V_S = (1 + \frac{1}{2} YZ) V_R + Z (1 + \frac{1}{6} YZ) I_R \quad (2.17)$$

$$I_S = Y (1 + \frac{1}{6} YZ) V_R + (1 + \frac{1}{2} YZ) I_R \quad (2.18)$$

Pengaturan tegangan dan efisiensi daya:

- Pengaturan tegangan

$$\Delta V = \left| \frac{V_S - V_R}{V_R} \right| \times 100\% \quad (2.19)$$

- Efisiensi Daya

$$\eta = \left| \frac{P_R}{P_S} \right| \times 100\% \quad (2.20)$$

2.1.3 Sistem Distribusi

Sistem distribusi adalah jaringan membawa daya dari saluran transmisi untuk dialirkan kepada konsumen-konsumen. Sistem distribusi menurunkan tegangan dari sistem transmisi menggunakan gardu induk yang kemudian akan dialirkan pada konsumen-konsumen sesuai dengan kebutuhan dari konsumen tersebut. Pada sistem distribusi juga terdapat trafo distribusi untuk menurunkan level tegangan menjadi tegangan yang digunakan pada konsumen rumah tangga.

Distribusi di area perkotaan lebih sering dipasang secara *underground*, terkadang di saluran utilitas umum. Distribusi pedesaan sebagian besar dipasang di atas tanah dengan tiang listrik, dan untuk distribusi di lokasi pinggiran kota adalah campuran. Ketika berada lebih dekat dengan pelanggan, trafo distribusi menurunkan daya distribusi primer ke sirkuit sekunder bertegangan rendah, pada umumnya 240 V untuk pelanggan perumahan. Daya sampai ke pelanggan melalui penurunan layanan dan meteran listrik. Sirkuit terakhir dalam sistem perkotaan mungkin kurang dari 50 kaki (15 m), tetapi mungkin lebih dari 300 kaki (91 m) kaki untuk pelanggan di lokasi pinggiran kota.[6]

2.1.3 Beban

Dalam sistem tenaga listrik, beban pada umumnya dibagi menjadi 3, yaitu beban industri, beban komersial, dan beban residensial. Beban industri yang besar kemungkinan besar akan disuplai oleh sistem jaringan transmisi atau sub-transmisi. Berbeda dengan industri sedang yang mendapat suplai dari jaringan distribusi primer. Sedangkan, untuk beban residensial akan mendapat suplai dari jaringan distribusi sekunder.

Bentuk dari beban pada industri biasanya berupa motor komposit atau motor induksi. Berbeda dengan beban yang terdapat pada beban residensial dan komersial yang biasanya berupa lampu, pendingin, pemanas, dan motor induksi 1-fasa. Beban pada residensial dan komersial memiliki frekuensi yang tetap sehingga hanya membutuhkan daya reaktif dalam jumlah sedikit.

Dalam pemodelan yang dilakukan dalam sistem tenaga listrik, biasanya beban akan dibagi menjadi 3 model beban, yaitu:[7]

1. Beban direpresentasikan sebagai daya konstan. Daya nyata (MW) dan daya reaktif (Mvar) dianggap konstan.
2. Beban direpresentasikan sebagai arus I dijaga agar tetap konstan.
3. Beban direpresentasikan sebagai impedansi konstan. Kondisi ini sering dipakai dalam merepresentasikan beban dalam studi stabilitas.

2.2 Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya merupakan hal yang paling penting dan mendasar dalam proses menelusuri suatu permasalahan dalam bidang operasi dan perencanaan pada *power system*. [8] Berdasarkan keadaan pembangkitan yang ditentukan dan struktur jaringan transmisi, analisis aliran daya dapat menyelesaikan permasalahan sistem ketika dalam kondisi steady state. Oleh sebab itu, kondisi sistem ketika dalam keadaan transien tidak diperhatikan. Berbeda kasusnya dengan analisis dinamis, dimana yang diperhatikan adalah kondisi sistem ketika dalam keadaan mengalami gangguan. Hal itu menyebabkan pemodelan matematika dari kedua analisis tersebut berbeda, analisis aliran daya menggunakan sistem persamaan aljabar non-linear tanpa persamaan diferensial sedangkan analisis dinamis menggunakan persamaan diferensial. Hal yang perlu digaris bawahi adalah bahwa analisis dinamis didasarkan pada analisis aliran daya dan juga analisis aliran daya merupakan dasar dari metode analisis dinamis.

Dari semua analisis aliran daya, yang menjadi sasaran utamanya adalah menentukan besar nilai dan sudut fasa tegangan pada setiap bus. Diketuainya nilai tegangan membuat nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat dihitung. Berikutnya, nilai P dan Q tersebut dapat digunakan untuk mengetahui aliran daya pada sistem, begitu pula dengan rugi-rugi daya pada saluran. Dari tiap-tiap bus terdapat 4 besaran yang dapat diketahui, yaitu: daya aktif, daya reaktif, nilai tegangan, dan sudut fasa tegangan.

Bus pada power system dapat dibagi menjadi 3 macam dengan 2 di antara 4 nilai besaran telah diketahui, yaitu:

- a. Bus Referensi (Slack Bus): Bus yang selalu diketahui nilai besaran tegangan $|V|$ dan sudut fasa yang tetap dan telah

diberikan sebelumnya. Pada suatu sistem, hanya boleh terdapat satu bus yang dianggap sebagai bus referensi/slack bus.

- b. Bus Beban (PQ Bus): Bus yang nilai daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) telah diketahui. Sebagian besar bus pada perhitungan analisis aliran daya merupakan Bus PQ.
- c. Bus Generator (PV Bus): Bus yang besar nilai tegangan $|V|$ dan daya aktif (P) telah diketahui. PV bus biasanya memiliki sumber daya reaktif yang bisa dikontrol dan dapat menjaga nilai tegangan pada nilai yang diinginkan.

2.3 Analisis Stabilitas Sistem

Terdapat beberapa syarat agar sebuah sistem tenaga listrik dianggap baik, syarat-syarat tersebut adalah:

1. Reliability : kemampuan dari sistem untuk menyalurkan daya secara terus menerus atau kontinyu.
2. Quality : kemampuan dari sistem untuk menghasilkan nilai yang sesuai dengan standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. Stability : kemampuan sistem untuk kembali bekerja pada kondisi normal setelah terjadinya gangguan pada sistem.

Sistem tenaga listrik yang baik harus memenuhi dari ketiga syarat tersebut. Sistem tersebut harus mampu secara kontinyu memberi pasokan listrik dengan nilai dengan tegangan dan frekuensi sesuai dengan standar yang berlaku dan dapat kembali bekerja normal setelah terjadinya gangguan.

Sistem tenaga listrik memiliki variasi beban yang dinamis dan mengalami perubahan seiring berjalannya waktu. Selama terjadinya perubahan-perubahan ini sistem tetap harus daya listrik yang sesuai dengan standar yang ditetapkan. Apabila pada saat beroperasi terjadi lonjakan atau penurunan beban yang tidak terduga dan perubahan tersebut berdampak pada sistem dan tidak dapat diantisipasi maka kejadian tersebut dapat dikategorikan sebagai gangguan. Gangguan-gangguan tersebutlah yang dapat mengganggu stabilitas sistem.

Stabilitas sistem tenaga listrik sendiri dapat didefinisikan sebagai karakteristik atau sifat dari sebuah sistem tenaga listrik untuk dapat beroperasi dalam kondisi kesetimbangan pada saat kondisi operasi

normal dan dapat mengembalikan kondisi kesetimbangan setelah terjadinya gangguan pada sistem tersebut.[9] Oleh karena itu diperlukannya sebuah analisis untuk menjaga kestabilan dari sebuah sistem.

Sistem tenaga listrik saat ini dioperasikan pada kondisinya sangat dekat dengan batas stabilitas dari sistem karena mempertimbangkan faktor ekonomi dan lingkungan. Mempertahankan operasi sistem tenaga yang stabil dan aman merupakan persoalan yang sangat penting. Stabilitas sistem tenaga secara luas diklasifikasikan sebagai stabilitas sudut rotor-stabilitas *steady state* dan stabilitas transien, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan-stabilitas tegangan jangka pendek dan jangka panjang dan digerakkan oleh beban.

Analisis Kestabilan dapat dibagi menjadi tiga jenis dengan mempertimbangkan besar gangguan dan sifatnya, yaitu:

1. *Steady State Stability*

Steady state stability adalah kondisi dimana sistem tersebut mampu untuk menerima gangguan kecil yang bersifat gradual dan terjadi di sekitar titik kesetimbangan pada kondisi normal. Kestabilan ini bergantung pada peralatan yang beroperasi pada sistem tenaga listrik seperti beban, pembangkit, jaringan pada sistem transmisi, dan kontrol dari sistem itu sendiri. Model pembangkit yang digunakan pada sistem adalah pembangkit yang sederhana dimana sumber tegangannya konstan karena hanya meyangkut gangguan kecil disekitar titik keseimbangan.

2. *Transient Stability*

Kestabilan transien adalah kemampuan dari suatu sistem untuk dapat mencapai titik keseimbangan atau sinkronisasi setelah sistem tersebut mengalami gangguan yang besar sehingga menyebabkan sistem tersebut kehilangan kestabilan karena gangguan yang terjadi melampaui dari batas kemampuan sistem. Gangguan dalam kasus ini adalah gangguan besar yang terjadi secara mendadak dengan durasi sekitar satu swing pertama.

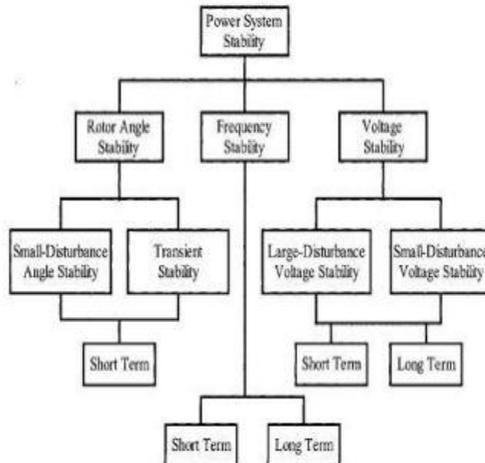
Analisis kestabilan transien adalah analisis yang utama dalam menelaah perilaku dan keadaan dari sebuah sistem tenaga listrik, sebagai contoh adalah gangguan yang berupa:

- A. Perubahan beban yang mendadak karena terputusnya unit pembangkit.
 - B. Perubahan jaringan transmisi semisal ketika terjadinya gangguan singkat atau switching.
3. *Dynamic Stability*

Dynamic stability adalah kemampuan dari sebuah sistem tenaga listrik untuk kembali pada titik keseimbangan setelah terjadinya gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam jangka waktu yang lama. Analisis kestabilan dinamis lebih kompleks karena mengikut sertakan komponen kontrol dari sistem tersebut.

Kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan berdasarkan beberapa hal di bawah ini:

- A. Sifat alami dari ketidakstabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter sistem utama dimana ketidakstabilan bisa diamati.
- B. Ukuran gangguan dianggap menunjukkan metode perhitungan dan prediksi ketidakstabilan yang paling sesuai.
- C. Divais, proses, dan rentang waktu yang harus diambil untuk menjadi pertimbangan dalam menentukan kestabilan.



Gambar 2. 7 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

2.3.1 Analisis Stabilitas Tegangan

Kestabilan tegangan dari suatu sistem berhubungan dengan kemampuan dari sistem itu sendiri untuk menjaga tegangan pada semua bus untuk tetap stabil pada kondisi beroperasi normal maupun setelah terjadinya gangguan.[9] Akibat yang dapat ditimbulkan dari ketidak stabilan tegangan yang terjadi adalah hilangnya beban di daerah yang tegangannya rendah dan di luar batas atau hilangnya integritas sistem. Biasanya yang menjadi faktor utama dalam terjadinya ketidakstabilan tegangan adalah drop tegangan yang terjadi ketika aliran daya aktif dan reaktif mengalir melalui reaktansi induktif dimana hal ini terkait dengan sistem transmisi. Keadaan ini membatasi kemampuan dari jaringan transmisi dalam melakukan transfer daya.

Masalah kestabilan tegangan pada umumnya terjadi pada sistem yang memiliki nilai pembeban besar. Ketidakstabilan yang terjadi pada sistem dapat memicu terjadinya *voltage collapse*. Munculnya fenomena *voltage collapse* atau runtuh tegangan terjadi dipicu oleh gangguan-gangguan seperti naiknya beban atau gangguan besar yang terjadi secara tiba-tiba. Batas kendali tegangan / daya reaktif generator, karakteristik kompensator daya reaktif, karakteristik beban, dan juga operasi dari alat kendali tegangan seperti trafo on –load tap changer dapat juga menjadi penyebab terjadinya runtuh tegangan pada sistem tenaga listrik.

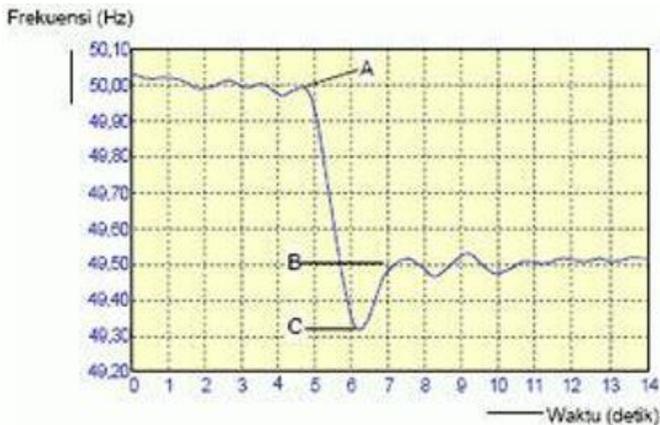
Pada proses terjadinya runtuh tegangan pada sistem biasanya memiliki durasi selama beberapa detik sampai beberapa menit. Kestabilan tegangan juga dipengaruhi oleh peralatan-peralatan dan alat kendali sistem tenaga listrik dalam sistem oleh karena itu perlu dilakukannya analisis untuk suatu sistem karena setiap sistem memiliki karakteristik dan gangguan yang berbeda-beda dimana hal itu akan menentukan fenomena yang penting untuk sistem tenaga listrik tersebut.

2.3.3 Analisis Stabilitas Frekuensi

Pada sebuah sistem tenaga listrik, frekuensi dapat dijadikan sebuah indikator keseimbangan antara total beban sistem dengan beban yang terbangkitkan pada sistem tersebut. Naiknya beban pada sistem atau berkurangnya tenaga yang dibangkitkan akan menyebabkan turunnya frekuensi. Penurunan frekuensi dapat berakibat fatal karena akan

menyebabkan kegagalan-kegagalan pada unit-unit pembangkitan secara beruntun hingga mengakibatkan kegagalan sistem total. Salah satu peralatan yang sering digunakan dalam menanggulangi masalah kestabilan frekuensi ini adalah rele frekuensi dimana rele akan melepaskan sebagian beban (*load shedding*) secara otomatis untuk mengembalikan kondisi frekuensi agar kembali seimbang. Load Shedding dianggap sebagai solusi yang paling memungkinkan untuk dilakukan demi menjaga stabilitas frekuensi dari sistem, tentunya dengan mempertimbangkan jenis beban yang akan dilepas. Pada beberapa kasus pelepasan beban akan ada beban prioritas dimana beban tersebut biasanya merupakan bangunan vital seperti rumah sakit atau juga diprioritaskan karena merupakan pelanggan prioritas.

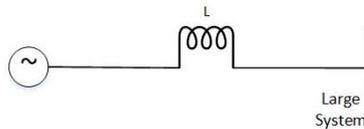
Ilustrasi gambar 2.8 menunjukkan hubungan antara pembangkitan dan beban yang tidak seimbang pada sistem dapat menyebabkan frekuensi bergeser dari nilai normalnya. Dalam kasus ini ketika beban lebih besar daripada pembangkitan maka frekuensi sistem akan dibawah 50 Hz, hal ini juga berlaku untuk kasus sebaliknya. Oleh karena itu perlu selalu dijaga keadaan yang seimbang antara pembangkitan dan beban agar tercipta frekuensi sistem yang normal yaitu 50 Hz dan apabila terjadinya gangguan masih dalam batas-batas stabilitas yang telah ditentukan standarisasinya.



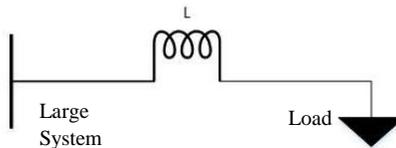
Gambar 2. 8 Ilustrasi Kestabilan Frekuensi

2.3.3 Hubungan Antara Stabilitas Tegangan dengan Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor, sebagaimana stabilitas tegangan dipengaruhi oleh kontrol daya reaktif. Pada umumnya, ketidakstabilan akibat adanya gangguan kecil (*steady-state*) berupa kenaikan sudut yang tidak periodik. Kejadian tersebut adalah masalah utama sebelum pada akhirnya *Automatic Voltage Regulator* dari generator bekerja. Maka dapat dikatakan bahwa hubungan yang dimiliki antar stabilitas sudut akibat gangguan kecil dengan kestabilan tegangan jangka panjang adalah pembatasan arus generator atau pembatas eksitasi berlebih.



Gambar 2. 9 *Pure Angle Stability*



Gambar 2. 10 *Pure Voltage Stability*

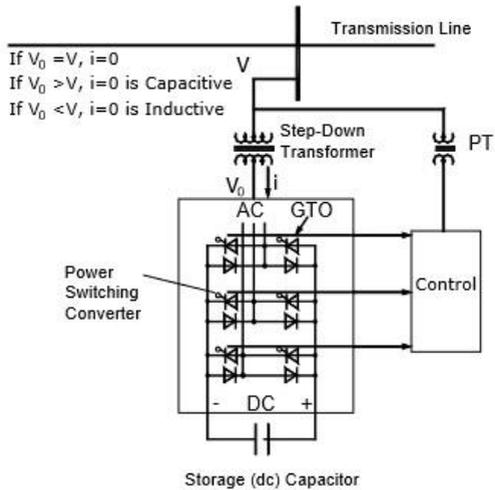
Stabilitas tegangan erat kaitannya dengan karakteristik area beban. Pada dasarnya stabilitas tegangan adalah stabilitas beban., sedangkan stabilitas sudut rotor adalah stabilitas generator. Pada sistem interkoneksi yang besar, fenomena *voltage collapse* pada area beban terjadi akibat hilangnya sinkronisasi generator. Maka dapat dikatakan bahwa *voltage collapse* pada sistem transmisi merupakan masalah yang berkaitan dengan ketidakstabilan sudut rotor, namun apabila fenomena tersebut terjadi di area beban maka merupakan masalah ketidakstabilan tegangan.

2.4 *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*

Static Synchronous Compensator merupakan salah satu *Flexible AC Transmission System (FACTS) Devices* yang terhubung secara shunt yang memegang peranan penting pada pengontrolan aliran daya dan memperbaiki kestabilan transien pada sistem.[3] STATCOM kerap kali dikatakan sebagai bentuk pengembangan dari peralatan FACTS lain yaitu Static Var Compensator (SVC). Hal tersebut dikarenakan sistem pemasangan STATCOM yang menyerupai dan prinsip kerja pada STATCOM yang juga menggunakan prinsip dasar SVC. STATCOM adalah peralatan elektronika daya yang menggunakan prinsip *Voltage-Sourced Converter (VSC)*. Tegangan DC akan dikonversikan menjadi tegangan keluaran tiga fasa dengan nilai, frekuensi, dan sudut fasa yang diinginkan.[10] STATCOM terdiri atas kapasitor DC yang dihubungkan secara shunt kepada saluran AC, dimana berfungsi sebagai saklar berkecepatan tinggi.

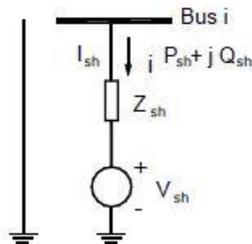
Dapat dikatakan bahwa STATCOM adalah sebuah divais yang termasuk dalam kategori FACTS yang dapat mengatur aliran daya reaktif dalam sistem yang independen dengan parameter sistem yang lain. STATCOM tidak mempunyai dukungan energi jangka panjang pada sisi DC dan tidak dapat memberi daya aktif pada sistem AC. Dalam sistem transmisi, utamanya STATCOM hanya menangani pertukaran daya reaktif mendasar dan memberikan dukungan tegangan ke bus oleh modulasi voltase bus selama gangguan dinamis untuk memberikan transien yang lebih baik, meningkatkan margin stabilitas sementara dan untuk meredam osilasi sistem karena gangguan ini.[11]

Pada gambar 2.11 dapat dilihat konfigurasi yang sering digunakan dalam instalasi STATCOM, STATCOM biasanya terdiri atas trafo (yang terkopel), inverter dan kapasitor DC. Untuk konfigurasi tersebut, pada kondisi steady state ideal, dapat diasumsikan bahwa pertukaran nilai daya aktif STATCOM dengan Sistem AC dapat diabaikan, sehingga hanya nilai daya reaktif saja yang diperhatikan. Dapat dilihat bahwa terdapat converter yang berfungsi bagaikan switching dimana switching tersebut berfungsi untuk sudut fase berdasarkan sudut penyalan dari switching tersebut.



Gambar 2. 10 Konfigurasi STATCOM

Untuk dua sumber AC yang memiliki frekuensi yang sama dan terhubung melalui rangkaian induktansi seri, daya aktif mengalir dari sumber utama ke sumber lagging dan daya reaktif mengalir dari sumber magnitudo tegangan tinggi ke sumber magnitudo tegangan rendah.[9] Perbedaan sudut fase antara sumber menentukan aliran daya aktif dan perbedaan besarnya tegangan antara sumber menentukan aliran daya reaktif. Jadi, STATCOM dapat digunakan untuk mengatur aliran daya reaktif dengan mengubah besaran tegangan VSC sehubungan dengan tegangan bus sumber.[9]



Gambar 2. 9 Rangkaian Ekuivalen STATCOM

Gambar 2.12 menunjukkan rangkaian ekuivalen dari STATCOM yang dapat diturunkan berdasarkan prinsip operasi mereka. Dari penurunan tersebut dapat diasumsikan bahwa (A) harmonisa yang dihasilkan oleh STATCOM diabaikan; (B) sistem serta STATCOM seimbang tiga fase.

Kemudian STATCOM dapat direpresentasikan oleh sumber tegangan V_{sh} frekuensi dasar berurutan positif yang dapat dikendalikan.[12] Pada prinsipnya, tegangan output STATCOM dapat diatur sedemikian rupa sehingga daya reaktif STATCOM dapat diubah. Sesuai dengan rangkaian setara STATCOM yang ditunjukkan pada Gambar 2.12. misalkan $\underline{V}_{sh} = V_{sh} \angle \theta_{sh}$, $\underline{V}_i = V_i \angle \theta_i$, maka batasan aliran daya STATCOM adalah:

$$P_{sh} = Vi^2 g_{sh} - ViV_{sh} (g_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh} \sin(\theta_i + \theta_{sh})) \quad (2.1)$$

$$Q_{sh} = -Vi^2 b_{sh} - ViV_{sh} (g_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh}) - b_{sh} \cos(\theta_i + \theta_{sh})) \quad (2.2)$$

Dimana $g_{sh} + jb_{sh} = 1/Z_{sh}$

Batasan pengoperasian STATCOM adalah pertukaran daya aktif melalui dc-link seperti yang dijelaskan oleh:

$$PE = RE(V_{sh}I_{sh}^*) = 0 \quad (2.3)$$

Dimana

$$RE(V_{sh}I_{sh}^*) = V_{sh}^2 g_{sh} - ViV_{sh} (g_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh}) - b_{sh} \sin(\theta_i + \theta_{sh}))$$

2.5 Standarisasi Tegangan dan Frekuensi

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 03 Tahun 2007,[13] terdapat standarisasi dari nilai tegangan dan frekuensi yang diperbolehkan dalam operasi Sistem Kelistrikan JAMALI. Frekuensi Sistem dipertahankan dalam kisaran $\pm 0,2$ Hz di sekitar 50 Hz, kecuali dalam periode transien yang singkat, dimana penyimpangan sebesar $\pm 0,5$ Hz diizinkan, serta selama kondisi darurat. Pengendalian frekuensi dicapai melalui:

1. Aksi governor unit pembangkit (regulasi primer).

2. Unit pembangkit yang memiliki *automatic generation control* (pengendalian sekunder).
3. Perintah Pusat Pengatur Beban ke Pembangkit untuk menaikkan atau menurunkan tingkat pembebanan pembangkit dalam rangka mengantisipasi perubahan beban.
4. Penurunan tegangan dalam rangka menurunkan beban Sistem.
5. Pengurangan beban secara manual.
6. Peralatan pelepasan beban otomatis dengan rele frekuensi rendah.
7. Pelepasan generator oleh rele frekuensi lebih.

Untuk batas tegangan Sistem harus dipertahankan dalam batasan sebagai berikut:

Tabel 2. 1 Batas Kerja Tegangan Sesuai Level Tegangan

Tegangan Nominal	Kondisi Normal
500 kV	+5%, -5%
150kV	+5%, -10%
70 kV	+5%, -10%
20 kV	+5%, -10%

Pengendalian Tegangan dicapai dengan langkah berikut:

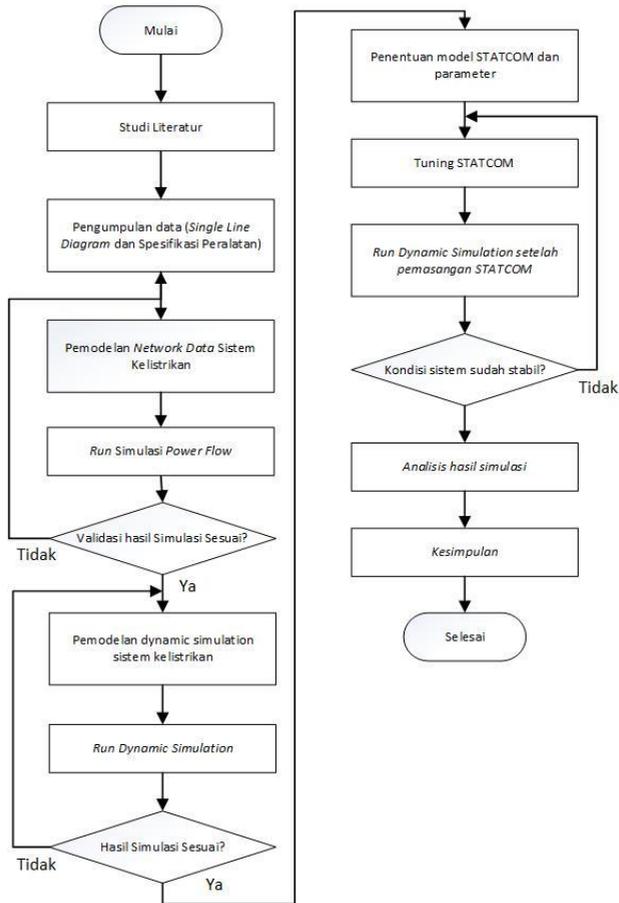
1. Generator-generator sinkron yang dilengkapi pengaturan tegangan. Penambahan *stabilization control loops* (*Power System Stabilizer - PSS*) pada pengaturan tegangan memperbaiki stabilitas dinamik dari Sistem.
2. *Synchronous condenser*.
3. Kompensator VAR statik.
4. Kapasitor paralel (*shunt*).
5. Reaktor *Shunt*.
6. Perubahan tap transformator.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III

PEMASANGAN STATCOM PADA SISTEM JAMALI UNTUK PENGONTROLAN *POWER* *FLOW* PADA SALURAN

3.1 Diagram Alir Metode Analisis Pemasangan STATCOM pada sistem JAMALI



Gambar 3. 1 Diagram alir skema penelitian

3.2 Penjelasan Diagram Alir Metode Analisis Pemasangan STATCOM pada Sistem JAMALI

Berikut ini merupakan penjelasan secara rinci mengenai diagram alir metodologi pengerjaan dari Tugas Akhir pada gambar 3.1:

- Langkah 1 :Metodologi dimulai dengan studi literatur dalam rangka untuk menentukan tujuan, perumusan masalah, dan mengerahui mengenai metode-metode yang akan digunakan dalam pelaksanaan Tugas Akhir ini.
- Langkah 2 :Pengumpulan data meliputi data pembangkitan, data pembebanan, data saluran dan data transformator pada sistem JAMALI 500 kV pada tahun 2018.
- Langkah 3 :Membuat pemodelan *network data* pada *software* PSS/E 33 yang akan digunakan untuk melakukan simulasi *power flow*. Pemodelan sedapat mungkin sesuai dengan data yang didapatkan pada sistem *real*.
- Langkah 4 :Melakukan simulasi power flow pada *software* PSS/E 33 dan Digsilent.
- Langkah 5 :Hasil running power flow pada software PSS/E dan Digsilent kemudian dianalisis. Hasil pada PSS/E divalidasi dengan Digsilent sehingga data yang diperoleh sesuai. Data pada PSS/E adalah data yang selanjutnya akan digunakan pada pengerjaan Tugas Akhir.
- Langkah 6 :Membuat pemodelan untuk *running dynamic simulation*. *Initial condition* pada *dynamic simulation* yang digunakan pada software PSS/E didapatkan melalui data hasil *running power flow* yang sebelumnya telah dilakukan.[14] Parameter untuk pemodelan ini disesuaikan dengan data yang telah didapatkan sebelumnya.
- Langkah 7 :Melakukan *dynamic simulation* pada software PSS/E 33. Pada tahap ini dilakukan beberapa kondisi sistem dimana untuk kondisi *running* pertama yang digunakan adalah untuk mendapatkan kondisi sistem saat dalam keadaan normal (tanpa gangguan). Kemudian dilakukan berbagai

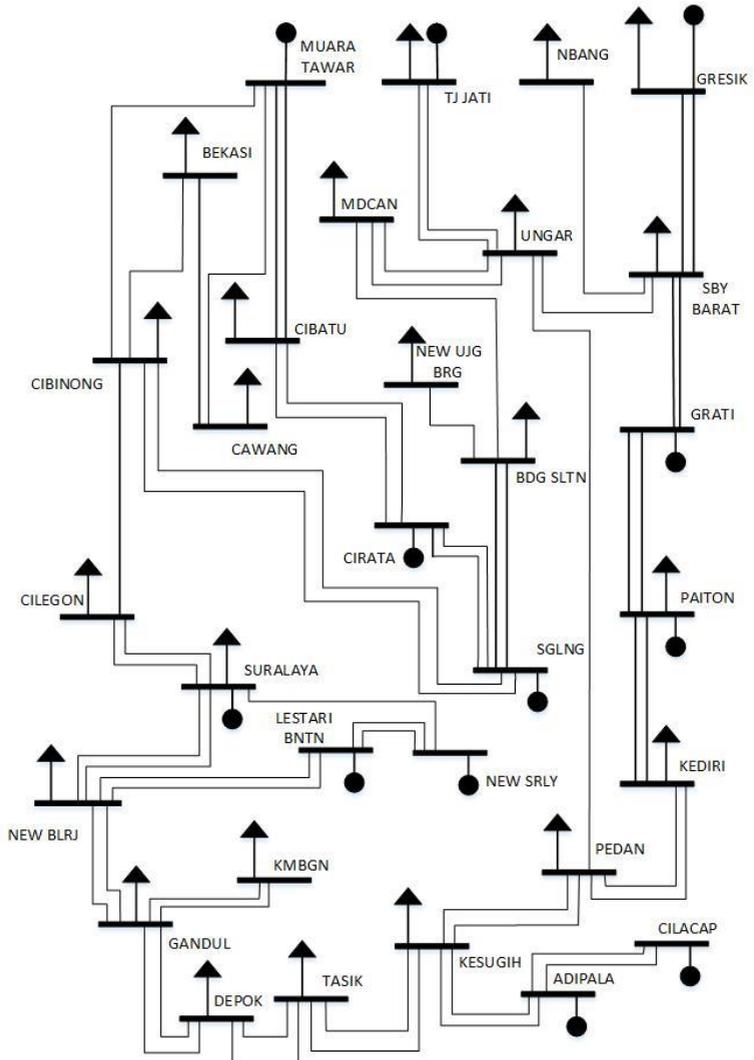
macam kondisi gangguan yang mungkin terjadi pada sistem (*line fault*, kontingensi *line trip* n-1). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan kondisi eksisting sistem ketika adanya gangguan yang terjadi pada sistem.

- Langkah 8 :Dilakukan validasi hasil dynamic simulation dengan melihat kondisi ketika tidak ada gangguan sesuai dengan hasil power flow.
- Langkah 9 :Penentuan model dari STATCOM yang akan digunakan dimana model STATCOM yang akan digunakan telah tersedia pada library PSS/E 33. Model STATCOM dipilih berdasarkan pada referensi [3] dan [15].
- Langkah 10 :*Tuning* dilakukan demi memperoleh hasil sistem yang paling baik. Tuning dilakukan dengan menyesuaikan nilai parameter pada model STATCOM dan membanding hasil dari setiap hasil simulasi dari *tuning* yang dilakukan.
- Langkah 11 :*Running dynamic simulation* setelah STATCOM terpasang pada sistem. Tahapan ini dilakukan untuk melihat kondisi dari sistem dan dampak dari pemasangan STATCOM pada sistem.
- Langkah 12 :Dilihat apakah kondisi sistem telah mengalami perbaikan setelah dilakukan pemasangan STATCOM pada sistem.
- Langkah 13 :Hasil dari simulasi kemudian dapat diolah dan dianalisis lebih lanjut. Dapat dilakukan perbandingan antara kondisi sistem sebelum dilakukan pemasangan STATCOM dengan hasil simulasi setelah dilakukan pemasangan STATCOM.
- Langkah 14 :Dari hasil simulasi yang telah dilakukan dan telah dilakukan analisis lebih lanjut kesimpulan dapat diambil. Pemasangan STATCOM dilakukan untuk memperbaiki kondisi sistem saat terjadinya gangguan atau kontingensi.

3.3 Sistem Kelistrikan JAMALI (Jawa-Madura-Bali)

Data yang digunakan pada Tugas Akhir ini adalah data sistem kelistrikan JAMALI (Jawa-Madura-Bali) tahun 2018 dimana data tersebut diperoleh dari PT. PLN P2B (Pusat Pengaturan Beban). Data

yang didapat kemudian diolah dan dibuat sesuai dengan pemodelan yang telah ditentukan seperti pada gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Single Line Diagram (SLD) JAMALI 500 kV

Sistem Transmisi 500 kV JAMALI pada tahun 2018 terdapat 31 bus dengan rincian 1 buah *swing bus*, 10 buah *generator bus*, dan 19 buah *load bus*. Untuk dapat mengerjakan Tugas Akhir ini, diperlukan pula data mengenai pembebanan maksimum pada setiap bus dan pembangkitan pada sistem JAMALI ini. Data tersebut dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3. 1 Data beban maksimum dan pembangkitan Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV

No. Bus	Nama Bus	Beban		Generator	
		P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	New Suralaya	0	0	568	115,4
4	Suralaya	116	53	2797	627,5
6	Lestari Banten	0	0	634	20
8	Bekasi	622	267	0	0
11	Muara Tawar	0	0	1215	421,6
13	Surabaya Barat	1120	379	0	0
18	Ngimbang	152	62	0	0
21	Gresik	150	357	491	258
26	Cirata	467	144	303	25
28	Saguling	0	0	89,8	212,1
29	Bandung Selatan	619	292	0	0
31	New Balaraja	1214	140	0	0
35	Depok	505	12	0	0
36	Grati	563	258	266	48
38	Gandul	422	99	0	0
42	Kembangan	155	-58	0	0
45	Tasikmalaya	123	67	0	0
46	Cilegon	631	216	0	0
51	Cibinong	600	195	0	0
53	Adipala	0	0	0	0

Tabel 3. 2 Data beban maksimum dan pembangkitan Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV lanjutan

No. Bus	Nama Bus	Beban		Generator	
		P (MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
54	Cawang	661	150	0	0
56	Cilacap	0	0	656	109
59	Pedan	651	219	0	0
60	Cibatu	1006	547	0	0
61	Kediri	454	252	0	0
62	New Ujung	0	0	0	0
63	Paiton	642	65	2731	574,6
64	Mandicaran	96	49	0	0
72	Ungaran	693	516	0	0
73	Tanjung Jati	248	90	2278	278,5
76	Kesugihan	0	0	0	0

Sistem Pembangkitan JAMALI 500 kV terdiri atas 11 pembangkit. Pembangkit-pembangkit tersebut terletak di Suralaya, Muara Tawar, Cirata, Saguling, Tanjung Jati, Gresik Grati, Paiton, Cilacap, Lestari Banten, dan satu lagi pembangkit baru yang merupakan penambahan dari pembangkit di Suralaya. Dari seluruh pembangkit tersebut, hamper semua pembangkit merupakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) atau *combined cycle* (PLTGU) kecuali untuk pembangkit Cirata dan Saguling yang merupakan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA).

Setiap bus pada Sistem Pembangkitan JAMALI 500 kV memiliki tingkat pembebanan yang berbeda-beda dan memiliki tingkat pembangkitan yang berbeda-beda pula. Data dari pembebanan dan pembangkitan ini sangat diperlukan dalam Tugas Akhir ini untuk dapat membuat suatu pemodelan dari Sistem Transmisi JAMALI 500 kV yang sesuai dengan kondisi eksisting saat ini. Dari data eksisting tersebut nantinya baru akan diolah lebih lanjut agar nantinya dapat terlihat perubahan yang terjadi pada sistem sebelum diterapkannya

pemasangan STATCOM dengan kondisi setelah peralatan STATCOM terpasang pada sistem. Seluruh data yang dimasukkan ke dalam Tugas Akhir ini merupakan data Sistem Transmisi JAMALI 500 kV yang telah terintegrasi.

Dalam pembuatan pemodelan dari Sistem JAMALI 500 kV, terdapat 2 tahapan yang harus dilakukan agar dapat melakukan simulasi *power flow* dan *dynamic simulation*. Simulasi *power flow* pada *software* PSS/E 33 menggunakan data pada network data case dalam pengoperasian dari simulasi tersebut. Sehingga perlu dibuatnya network data case dahulu sebelum kemudian simulasi *power flow* dapat dilakukan. Setelah simulasi *power flow* telah dilakukan barulah dapat dilakukan pemodelan terhadap *dynamic data* yang nantinya akan digunakan pada saat *running dynamic simulation*. *Dynamic data* inilah yang juga harus disesuaikan parameternya dengan kondisi eksisting Sistem Transmisi JAMALI 500 kV dengan mempertimbangkan variabel-variabel yang dipilih sesuai juga dengan batasan yang diberikan oleh *software* PSS/E pada saat akan menjalankan *dynamic simulation*.

Untuk pemodelan *dynamic data* dari Sistem Transmisi JAMALI 500 kV sendiri menggunakan model generator yang tersedia pada library PSS/E 33 dimana pemodelan tersebut dipilih berdasarkan dari data di lapangan yang telah didapatkan. Dalam pemodelan ini digunakan 2 tipe generator berbeda, yaitu model generator GENROU dan model generator GENSAL. Untuk penjelasan lebih lanjut dari tipe model generator yang digunakan akan dijelaskan sebagai berikut:[16]

1. GENROU (*Round Rotor Generator Model*)

GENROU merupakan pemodelan dari generator dengan rotor tipe *round* atau juga dapat disebut silinder. Pemodelan GENROU sendiri merupakan model Round Rotor Generator yang menggunakan prinsip *quadratic saturation*.

2. GENSAL (*Salient Pole Generator Model*)

GENSAL merupakan pemodelan dari generator dengan rotor tipe *salient* atau juga disebut kutub sepatu. GENSAL sendiri merupakan model *Salient Pole Rotor Generator* yang menggunakan prinsip *quadratic saturation* pada *D-Axis*.

Kedua pemodelan tersebut pada penggunaannya memiliki parameter-parameter yang berbeda karena parameter yang ada pada pemodelan pada PSS/E 33 dibuat sedemikian rupa sehingga menyerupai dari kinerja generator *round rotor* dan *salient pole*. Parameter dalam model generator tersebut diisi dengan mengacu pada data-data yang didapatkan pada awal dilakukakannya penelitian ini dan juga mengacu pada data parameter dari *software* digsilent. Data-data parameter dari generator generator tersebut adalah sebagai berikut:

1. Data GENROU

Tabel 3. 3 Data Parameter Pemodelan Dynamic GENROU

Parameter	New Suralaya	Suralaya	Lestari Banten	Gresik	Grati
T'do (>0)	8,2	1,1	8,2	1,3285	2,2
T''do (>0)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,063
T'qo (>0)	0,3	1	0,2	0,2	0,2
T''qo (>0)	0,19	0,05	0,041	0,05	0,05
H, Inertia	4	4	4,25	4	4
D, Speed Damping	0	0	0	0	0
Xd	2,45	2,23	2,348	2,217	1,09
Xq	2,4	2,19	2,286	2	0,65
X'd	0,268	0,297	0,268	0,289	0,29
X'q	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
X''d = X''q	0,2345	0,23	0,2345	0,1915	0,1915
Xl	0,195	0,1	0,195	0,1	0,1
S(1,0)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
S(1,2)	0,5	0,5	0,5	0,1	0,5

Tabel 3. 4 Data Parameter Pemodelan Dynamic GENROU lanjutan

Parameter	Adipala	Cilacap	Paiton	Tj Jati	Saguling	Gen SGLNG
T'do (>0)	9	9	2,2	2,2	2,2	2,2
T''do (>0)	0,05	0,05	0,063	0,063	0,063	0,063
T'qo (>0)	1	1	0,2	0,2	0,2	0,2
T''qo (>0)	0,08	0,08	0,05	0,05	0,05	0,05
H, Inertia	1,7	1,7	4	4	4	4
D, Speed Damping	0	0	0	0	0	0
Xd	1,8	1,8	1,09	1,09	1,09	1,09
Xq	1,75	1,75	0,65	0,65	0,65	0,65
X'd	0,6	0,6	0,229	0,23	0,229	0,229
X'q	0,8	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3
X''d = X''q	0,2565	0,2565	0,2045	0,229	0,1415	0,1415
Xl	0,15	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1
S(1,0)	0,09	0,09	0,1	0,1	0,1	0,1
S(1,2)	0,38	0,38	0,5	0,5	0,5	0,5

2. Data GENSAL

Tabel 3. 5 Data Parameter Pemodelan Dynamic GENSAL

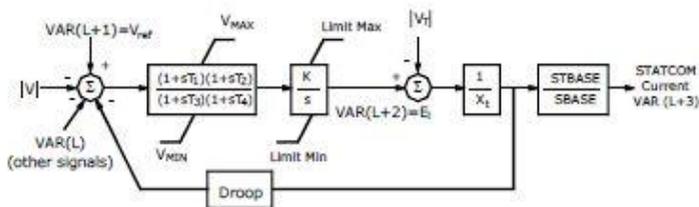
Parameter	Muara Tawar	Cirata
T'do (>0)	6,67	9,7
T''do (>0)	0,075	0,05
T'qo (>0)	0,2	0,2
H, Inertia	4	4,5
D, Speed Damping	0	0
Xd	2	1,8

Tabel 3. 6 Data Parameter Pemodelan Dynamic GENSAL lanjutan

Parameter	Muara Tawar	Cirata
Xq	1,9	1,75
X'd	0,3	0,274
X"d = X"q	0,2	0,189
Xl	0,1	0,13
S(1,0)	0,1	0,1
S(1,2)	0,5	0,5

3.4 STATCOM dalam Sistem

Dalam aliran beban, STATCOM dimodelkan sebagai kondensator sinkron; yaitu, kondensator tanpa output daya aktif. Model dinamis STATCOM seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 5, di mana disajikan model yang menyediakan PSS / E 33 dan disebut CSTCNT.



Gambar 3. 3 Diagram Blok STATCOM model PSS/E 33 (CSTCNT)

Input ke model adalah tegangan yang dipantau (V), referensi tegangan (V_{ref}), dan sinyal dari kontrol VAR (L) seperti stabilisator sistem tenaga. Output dari model adalah arus reaktif. Arus negatif sesuai dengan kinerja STATCOM sebagai sebuah reaktor, positif sebagai kapasitor. Model dinamis PSS/E 33 adalah komposit dari regulator tegangan dengan *gain* transien, ditentukan oleh konstanta waktu (T_1 hingga T_4) dan *gain* integrator (K). Gain kondisi-stabil per unit sama dengan kebalikan dari *Droop*. *Droop* memungkinkan

pembagian kontrol tegangan dengan STATCOM atau generator lainnya.[3]

Dalam pemilihan variabel-variabel yang diisikan pada parameter STATCOM yang akan dilakukan pemasangan pada sistem, perlu dilakukan tuning pada setiap parameter demi mendapatkan hasil simulasi akhir yang terbaik.[15] Proses tuning tersebut meliputi pengamatan terhadap pengaruh perubahan dari variabel yang digunakan pada output tegangan dari sistem.

Parameter ICMAX dan ILMAX merupakan representasi dari Kapasitor dan Induktor pada STATCOM dimana semakin besar nilai parameter berarti semakin besar pula kapasitas dari kapasitor dan induktor yang diperlukan pada STATCOM yang digunakan. Apabila STATCOM tidak dapat menyuplai kompensasi kapasitansi atau induktansi sebesar nilai yang diinginkan, dapat dilakukan penambahan kapasitor dan induktor tambahan untuk memenuhi kebutuhan tersebut.[17]

Tabel 3. 7 Data Parameter Pemodelan STATCOM (CSTCNT)

PARAMETER	STATCOM (CSTCNT)
T1 (>0)	0,1
T2 (>0)	0,1
T3 (>0)	0,1
T4 (>0)	0,1
K	25
Droop	0,01
VMAX	999
VMIN	-999
ICMAX	6
ILMAX	6
VCUTOUT	0,2
ELIMIT	1,2
XT	0,1
ACC	0,05
STBASE (>0)	400

Untuk Parameter STBASE merupakan parameter yang menentukan besaran dari kapasitas STATCOM. Pada Tugas Akhir kali ini nilai yang digunakan untuk parameter STBASE adalah 400 MVA. Nilai 400 MVA dipilih berdasarkan kapasitas yang dibutuhkan oleh sistem dan disesuaikan dengan STATCOM yang tersedia saat ini di pasaran. Nilai 400 MVA sendiri sesuai dengan kebutuhan sistem dan kapasitas STATCOM terbesar yang tersedia di pasar saat ini sesuai dengan yang tertera pada [18] dan [19].

BAB IV

SIMULASI HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hasil dan analisis dari simulasi pada Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali 500 kV pada tahun 2018 berdasarkan pada studi kasus. Pada Tugas Akhir ini akan terdapat sebuah studi kasus yang akan coba diselesaikan dengan menggunakan metode pemasangan peralatan FACTS berupa STATCOM pada sistem. Studi kasus yang akan diselesaikan ditentukan berdasarkan pada hasil dari simulasi *power flow* dan *dynamic simulation* yang terlebih dahulu dilakukan. Sehingga perlu dilakukan simulasi *power flow* dimana hasilnya dapat dilihat pada bagian 4.1.

Dari Hasil analisis *power flow* yang telah dilakukan pada sistem didapatkan kondisi pada sistem yang perlu perbaikan. Kondisi tersebut juga didukung dengan hasil *dynamic simulation* yang juga dilakukan setelah dilakukannya simulasi *power flow*. Pada bagian 4.1 akan menjelaskan lebih lanjut mengenai analisis dari hasil simulasi *power flow*. Sedangkan untuk pembahasan hasil dan permasalahan seputar *dynamic simulation* akan dibahas lebih jauh bersama dengan studi kasus penelitian ini pada bagian 4.2.

Pada bab 4 ini juga akan ditampilkan hasil dari keadaan dari sistem sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan STATCOM. Setelah hasil dari seluruh rangkaian simulasi telah didapatkan maka akan dilakukan analisis yang akan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah STATCOM terpasang pada sistem untuk melihat dampak dari pemasangan STATCOM.

4.1 Hasil simulasi Power Flow

Pada simulasi *power flow* yang dilakukan pada Tugas Akhir ini, metode yang digunakan adalah Newton-Rhapson. Simulasi yang ditampilkan pada bab 4 ini adalah hasil dari simulasi yang dilakukan dengan menggunakan *software* PSS/E 33 dan telah divalidasi hasilnya dengan hasil *power flow* dari *software* Digsilent. Dari simulasi tersebut nantinya baru dapat dilakukan analisis lebih lanjut.

Tabel 4. 1 Hasil Power Flow (Tegangan, Sudut Tegangan, Daya Saluran) pada Bus Ungaran dan Tanjung Jati

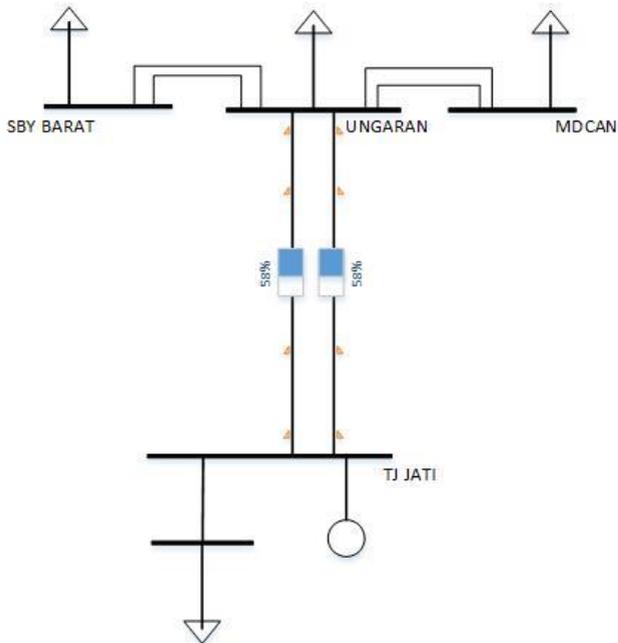
No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
73	UNGARAN	1	9,2	SBY BARAT	-43,3	-17,5
				PEDAN	0	-38,3
				PEDAN	503,3	-288
				MDCAN	422,4	-147
				MDCAN	422,4	-147
				TJ JATI	-999,3	-79,1
				TJ JATI	-999,3	-79,1
				3WNDTR UNGA	286,7	262,2
				3WNDTR UNGA	286,7	262,2
74	TJ JATI	1	17,6	GENLOAD TJJA	124	49,8
				GENLOAD TJJA	124	49,8
				UNGARAN	1015	89,5
				UNGARAN	1015	89,5

Pada tabel 4.1 menampilkan hasil dari *power flow* pada Bus Ungaran dan Bus Tanjung Jati. Dapat dilihat pada tabel terdapat kolom yang berwarna kuning dimana kolom tersebut menandakan bahwa kedua bus tersebut ditampilkan karena memperlihatkan kondisi yang patut untuk dianalisis lebih jauh dan berkaitan dengan Tugas Akhir ini. Oleh Karena itu Bus tersebut ditampilkan karena akan ditinjau lebih lanjut pada Bab 4.2 dimana Bab 4.2 akan membahas mengenai studi kasus yang akan digunakan pada Tugas Akhir kali ini yang mengacu pada analisis dari hasil power flow. Untuk Hasil lengkap simulasi *power flow* dapat dilihat pada Lampiran 1.

4.2 Studi Kasus

Hasil power flow yang ditampilkan pada tabel 4.1 menunjukkan kondisi eksisting dari Sistem Transmisi JAMALI 500 kV. Dari hasil tersebut dapat dilihat salah satu faktor yang dapat dianalisis adalah pembebanan saluran. Pembebanan pada Saluran Transmisi JAMALI 500 kV seperti yang ditampilkan pada 4.1 menampilkan salah satu kondisi yang bisa dianalisis lebih lanjut. Kondisi tersebut adalah pembebanan pada saluran yang menghubungkan antara Bus Tanjung Jati dengan Bus Ungaran. Dari hasil simulasi power flow, dapat diamati bahwa pembebanan pada saluran tersebut memiliki nilai sebesar 999,3 MW dan 79,1 Mvar. Apabila kita lihat kembali rating dari saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran tersebut. Rating yang dimiliki oleh saluran tersebut adalah 1714,7 MVA. Itu berarti apabila kita lakukan perbandingan antara pembebanan pada saluran dengan rating yang dimiliki oleh saluran tersebut maka kita akan mendapatkan bahwa saluran telah dibebani sebesar 58%.

Saluran yang menghubungkan antara Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran merupakan saluran ganda dimana kedua saluran tersebut memiliki rating dan nilai pembebanan yang sama. Oleh karena itu berarti apabila terjadi kontingensi *line trip* n-1 pada saluran tersebut. Saluran yang masih tersambung akan memikul beban yang seharusnya disalurkan melalui saluran yang *trip* tersebut. Dengan kondisi pembebanan pada kedua saluran yang telah mencapai 58%, dapat dikatakan apabila kejadian kontingensi *line trip* n-1 terjadi pada saluran tersebut maka pembebanan pada saluran yang tersisa akan melampaui 100%. Hal itu dikarenakan posisi dari Bus Tanjung Jati sendiri yang hanya terinterkoneksi dengan Sistem JAMALI 500 kV melalui saluran yang menghubungkan dengan Bus Ungaran. Topologi Sistem Transmisi JAMALI 500 kV yang seperti ini menyebabkan kondisi eksisting ini perlu untuk ditinjau kembali dan di analisis lebih lanjut pada saat kondisi transien ketika terjadinya gangguan dari sistem tersebut. Gambar SLD yang menggambarkan kondisi saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran dapat dilihat pada gambar 4.1



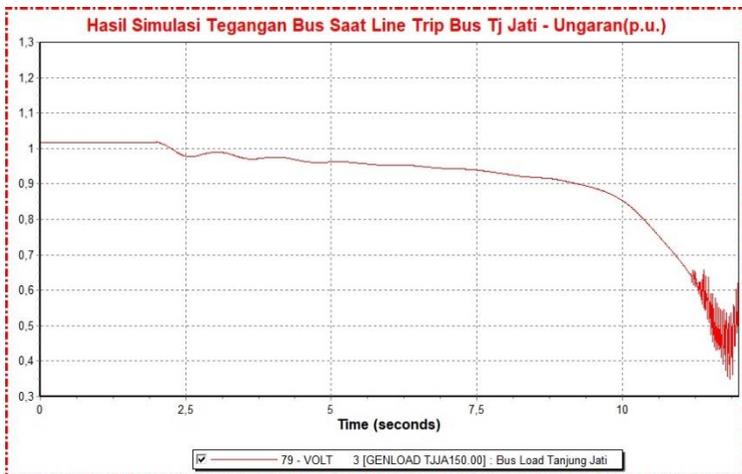
Gambar 4. 1 Saluran Bus Tanjung Jati- Bus Ungaran

Setelah dilakukan analisis dari hasil *power flow* maka dapat dilanjutkan dengan melihat kondisi sistem pada *dynamic simulation*. *dynamic simulation* dilakukan dengan tujuan untuk melihat kondisi sistem ketika adanya gangguan yang terjadi. *Dynamic simulation* yang dilakukan juga untuk melihat dampak dari pembebanan pada saluran yang menghubungkan antara Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran. Selain pada saluran tersebut, dilakukan juga *dynamic simulation* dengan kasus-kasus lain yang sekiranya apabila terjadi memungkinkan munculnya permasalahan sistem tenaga listrik. Terdapat beberapa kasus kontingensi yang dapat dipilih pada modul *dynamic simulation software* PSS/E 33. Untuk studi kasus kali ini kasus kontingensi yang dipilih untuk menjadi fokus utama dalam pelaksanaan *dynamic simulation* ini adalah kontingensi *line trip* n-1.

Pada simulasi ini juga akan ditampilkan hasil dari perbandingan antar terjadinya line trip pada saluran Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran dengan line trip pada saluran lain.

Langkah pertama yang dilakukan pada saat melakukan *dynamic simulation* ini adalah menentukan lokasi yang akan ditinjau kondisi dinamikanya. Dalam kasus ini, karena telah didapatkan data dan hasil analisis *power flow* dari sistem maka akan lebih mudah dalam menentukan lokasi untuk ditinjau. Saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Ungaran dipilih untuk ditinjau berdasarkan pada analisis hasil *power flow* yang telah dilakukan.

Simulasi dilakukan dengan melakukan kontingensi *line trip* n-1 pada saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Ungaran, dengan meninjau kondisi pada Bus Load Tanjung Jati dan Bus Tanjung Jati. Dari simulasi yang dilakukan ini dapat ditinjau kembali apakah analisis yang telah dilakukan terhadap hasil simulasi *power flow* yang telah dilakukan memiliki dampak pada sistem. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada gambar 4.2.



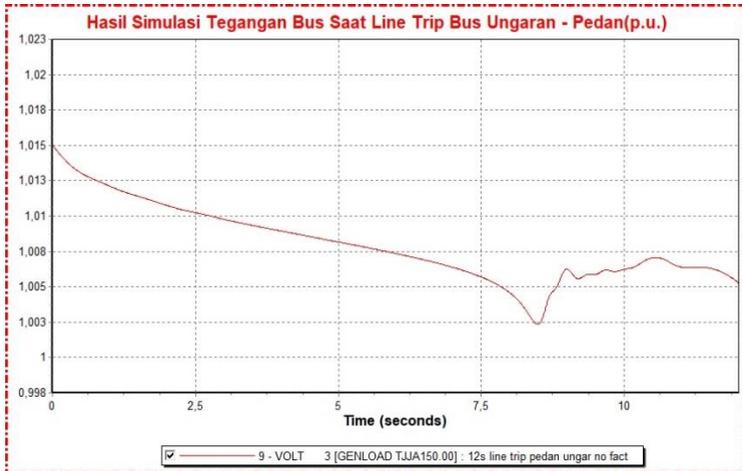
Gambar 4. 2 Simulasi Keadaan Line Trip pada Saluran Tj Jati-Ungaran Pada Bus Genload Tanjung Jati

Pada gambar 4.2 dapat dilihat pengaruh dari terjadinya kontingensi *line trip* n-1 pada saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran terhadap tegangan pada Bus Load Tanjung Jati. Saat awal terjadinya kontingensi. Tegangan pada bus menunjukkan penurunan secara perlahan hingga pada saat kontingensi terjadi selama $t=6$ maka tegangan pada bus mulai jatuh dan mulai terjadi osilasi. Turunnya nilai tegangan yang terjadi hingga berada di bawah nilai 0,9 menyebabkan sistem menjadi tidak stabil.

Dari hasil simulasi kontingensi *line trip* yang dilakukan dapat membuktikan analisis yang dilakukan pada hasil *power flow* bahwa kondisi topologi saluran yang menghubungkan antara Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran menyebabkan apabila terjadi kontingensi *line trip* n-1 dapat berakibat pada terjadinya gangguan pada sistem.

Untuk melihat kondisi keseluruhan dari sistem pada saat kondisi terjadinya gangguan, maka dilakukan juga *dynamic simulation* dengan kondisi kontingensi *line trip* n-1 pada saluran lain. Simulasi yang berikutnya akan ditinjau adalah *line trip* pada saluran yang menghubungkan Bus Ungaran dengan Bus Pedan. Simulasi ini dilakukan selain untuk mengetahui kondisi dari saluran tersebut juga untuk membandingkan kondisi dari kestabilan pada saat kondisi transien saluran Bus Pedan dan Bus Ungaran dengan kondisi dari kestabilan saluran Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran saat terjadinya kontingensi *line trip*.

Gambar 4.3 menampilkan hasil dari simulasi pengaruh terjadinya kontingensi *line trip* n-1 pada saluran yang menghubungkan Bus Ungaran dan Pedan terhadap tegangan pada Bus Load Tanjung Jati. Selama terjadinya kontingensi hingga detik $t=12$ yang diamati pada gambar tidak terjadi perubahan yang signifikan terhadap dengan pada Bus Load Tanjung Jati. Hal ini berarti sistem mampu untuk kembali ke kondisi stabil. Hal ini dimungkinkan karena topologi Sistem JAMALI 500 kV yang sudah terinterkoneksi sehingga beban yang seharusnya dibebankan pada saluran tersebut dapat melalui saluran yang lain dimana hal tersebut tidak dimungkinkan untuk dapat terjadi pada kasus kondisi saluran Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran karena hanya Bus Tanjung Jati hanya terhubung kepada sistem interkoneksi melalui Bus Ungaran.



Gambar 4. 3 Simulasi Keadaan Line Trip pada Saluran Tj Pedan-Ungaran Pada Bus Genload Tanjung Jati

Dari data yang didapatkan dari *dynamic simulation* yang telah dilakukan bahwa selain dari saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran, kondisi dari sistem menunjukkan kemampuan untuk dapat kembali ke keadaan stabil apabila sistem mengalami kontingensi *line trip* n-1 pada seluruh saluran (terkecuali saluran yang apabila terputus akan menyebabkan *total blackout*). Tabel 4.2 Menampilkan perbandingan tegangan pada bus Genload Tanjung Jati pada saat kondisi kontingensi *line trip* n-1 pada saluran Bus Tanjung Jati-Ungaran dengan kontingensi *line trip* n-1 pada saluran Bus Pedan-Ungaran. Pada tabel yang bertanda warna kuning menunjukkan kondisi tegangan dari bus ketika memasuki detik ke 10,11, dan 12 perbedaan terjadi pada kedua kondisi simulasi yang dilakukan. Pada kondisi simulasi n-1 pada Bus Tanjung Jati-Ungaran, tegangan pada saat memasuki detik 10,11, dan 12 menunjukkan nilai tegangan sebesar 0,853 pu, 0,681 pu, dan 0,62 pu dimana tersebut menunjukkan bahwa bus dalam kondisi yang tidak stabil dan dibawah nilai standar yaitu 0,9 pu.

Tabel 4. 2 Perbandingan Kondisi Saluran ketika Line Trip pada Saluran Bus Tj Jati-Ungaran dan Pedan-Ungaran

Kondisi Bus Genload Tj Jati			
Trip Tj Jati-Ungaran		Trip Pedan-Ungaran	
t (sekon)	v (pu)	t (sekon)	v (pu)
0	1,018	0	1,015
1	1,018	1	1,012
2	1,019	2	1,011
3	0,99	3	1,01
4	0,976	4	1,009
5	0,961	5	1,008
6	0,954	6	1,007
7	0,943	7	1,006
8	0,928	8	1,005
9	0,908	9	1,006
10	0,853	10	1,006
11	0,681	11	1,006
12	0,62	12	1,005

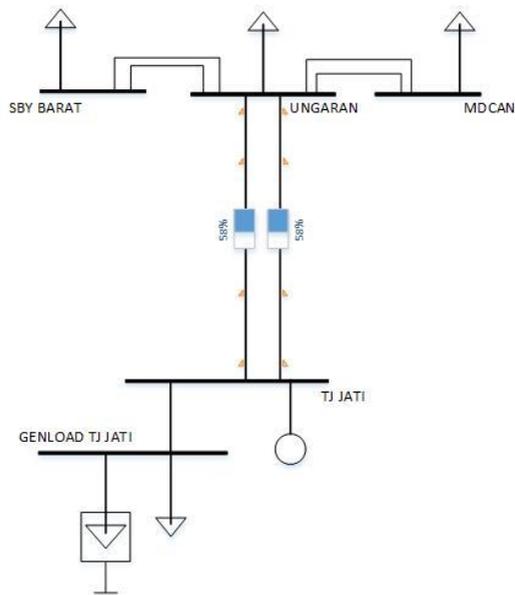
Berbeda dengan kondisi tegangan pada simulasi kontingensi n-1 pada saluran antara Bus Pedan dan Ungaran. Nilai tegangan pada bus tersebut bisa dikatakan stabil dengan melihat nilai tegangan pada awal simulasi dimulai $t=0$ bernilai 1,015 pu dan ketika waktu $t=12$ nilai dari tegangan adalah 1,005 pu dimana nilai tersebut masih dalam batas stabilitas dan tidak terjadi perubahan yang signifikan dalam nilai tegangan sebelum dan sesudah terjadinya kontingensi n-1.

Dengan melihat perbandingan dari data simulasi yang didapatkan dan analisis yang telah dilakukan. Maka diperlukannya peninjauan lebih jauh pada saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran. Oleh karena itu, pada Tugas Akhir ini akan ditinjau lebih lanjut mengenai studi kasus kondisi kestabilan transien pada saat terjadi kontingensi *line trip* n-1 pada Saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Ungaran dan melakukan pemasangan

STATCOM sebagai upaya untuk melakukan perbaikan atau pemulihan stabilitas. Untuk pembahasan lebih lanjut mengenai pemasangan STATCOM untuk menanggulangi kestabilan transien yang terjadi pada saluran yang menghubungkan Bus Tanjung Jati dan Bus Ungaran akan dibahas pada 4.3 sekaligus akan dipaparkan mengenai hasil dari pemasangan tersebut dan analisis dari hasil simulasi tersebut.

4.3 Hasil dan Analisis Dampak dari Pemasangan STATCOM

Setelah mendapatkan hasil dari *dynamic simulation*, maka selanjutnya akan dilakukan pemasangan STATCOM untuk memperbaiki kondisi kontingensi tersebut. Tempat pemasangan STATCOM yang dipilih adalah pada bus Genload Tanjung Jati yang terhubung dengan Bus Tanjung Jati. Bus tersebut dipilih karena



Gambar 4. 4 Letak Pemasangan STATCOM pada Saluran

posisinya yang seakan berada di ujung dari saluran yang menuju ke arah Bus Tanjung Jati.

Ketika hasil dari *dynamic simulation* setelah dilakukan pemasangan STATCOM pada sistem telah diperoleh, maka data tersebut dapat dianalisis lebih lanjut dengan membandingkan grafik dari kondisi transien dari sistem dan data yang diperoleh antara kondisi pada saat kontingensi n-1 tanpa terpasangnya STATCOM pada sistem dan setelah terpasangnya STATCOM pada sistem. Dari perbandingan tersebut dapat dianalisis mengenai dampak dari pemasangan STATCOM pada sistem.

Gambar 4.5 menampilkan hasil dari perbandingan kondisi Bus Genload Tanjung Jati pada saat terjadi kontingensi *line trip* n-1 pada saluran antara Bus Tanjung Jati dan Ungaran sebelum dan setelah pemasangan STATCOM pada sistem. Pada gambar 4.5 dapat diamati bahwa garis merah merepresentasikan kondisi tegangan pada Bus Genload Tanjung Jati sebelum dilakukan pemasangan STATCOM dan garis hijau merepresentasikan kondisi tegangan pada Bus Genload Tanjung Jati setelah dilakukan pemasangan STATCOM. Pada saat awal kondisi *line trip* terjadi, kondisi sistem tanpa STATCOM terlihat tampak masih mampu untuk menahan dari tegangan sistem agar tetap pada batas kestabilan, tetapi setelah $t=7,5$ detik sistem tidak dapat lagi



menahan tegangan pada batas kestabilannya sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

Berdasar dari grafik pada gambar 4.5, STATCOM memungkinkan untuk sistem dapat mempertahankan tegangan diatas batas stabilitas dan tetap bertahan dekat dengan nilai tegangan pada saat tidak terjadi kontingensi pada saluran. Berbeda halnya dengan kondisi grafik pada sistem yang tidak terpasang STATCOM dimana tepat pada saat terjadi kontingensi nilai tegangan pada sistem langsung menunjukkan terjadinya penurunan. Hal ini dapat dilihat lebih jelas dengan melihat data hasil simulasi yang ditampilkan pada tabel 4.3

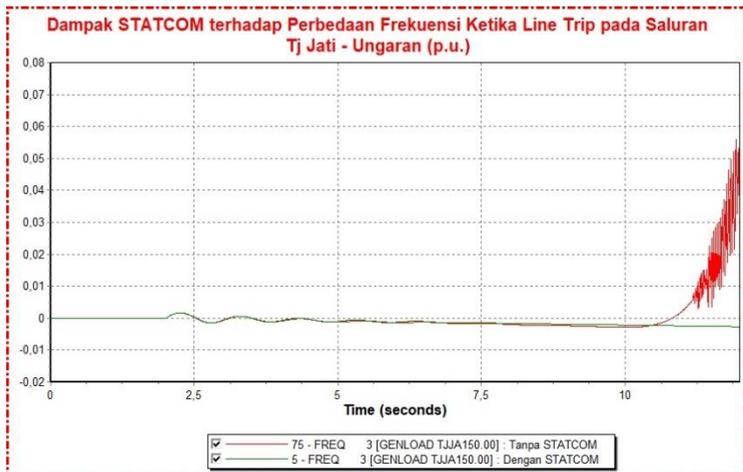
Tabel 4. 3 Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah STATCOM Terpasang pada Sistem di Bus Genload Tj Jati

Kondisi Bus Genload Tj Jati			
Tanpa STATCOM		Dengan STATCOM	
t (sekon)	v (pu)	t (sekon)	v (pu)
0	1,018	0	1,018
1	1,018	1	1,018
2	1,019	2	1,019
3	0,99	3	1,016
4	0,976	4	1,015
5	0,961	5	1,014
6	0,954	6	1,014
7	0,943	7	1,013
8	0,928	8	1,012
9	0,908	9	1,012
10	0,853	10	1,012
11	0,681	11	1,011
12	0,62	12	1,011

Dari tabel dapat dilihat lebih jelas bahwa kondisi Bus Genload Tanjung Jati pada detik 7,8,9,10,11, dan 12 apabila tidak terpasang STATCOM berada dibawah batas kestabilan tegangan dengan nilai tegangan berturut-turut sebesar 0,943 pu, 0,928 pu, 0,908 pu, 0,853

pu, 0,681 pu, dan 0,62 pu. Untuk kondisi sistem yang terpasang STATCOM sendiri walaupun terjadi sedikit penurunan pada nilai tegangan, tetapi tidak signifikan nilainya sehingga pada saat detik ke 10,11, dan 12 dari terjadinya gangguan tegangan masih dapat bertahan pada nilai 1,011 pu dimana nilai tersebut hanya turun 0,007 pu dari tegangan awal yang setara dengan penurunan tegangan sebesar 0,69%. Dari perbandingan grafik dan data hasil simulasi dan setelah dilakukan analisis lebih lanjut, dapat dikatakan bahwa pemasangan STATCOM pada sistem dapat mengembalikan sistem kembali ke batas stabilan bahkan hingga mendekati nilai awal dari tegangan sistem sebelum terjadinya gangguan.

Selain dari segi hubungan antara kemampuan STATCOM dengan keadaan tegangan ketika terjadinya kontingensi, dapat juga dilihat hubungannya dengan stabilitas frekuensi dari sistem. Gambar 4.6 memperlihatkan perbandingan kondisi frekuensi dari Bus Genload Tanjung Jati ketika sebelum dan sesudah pemasangan STATCOM. Dapat dilihat bahwa kondisi dari frekuensi dari sistem pada awalnya dapat bertahan dan stabil tanpa terjadinya osilasi, tetapi pada saat gangguan $t=9$ detik frekuensi dari bus mengalami kenaikan sekaligus terjadi osilasi pada saat bersamaan. Hal tersebut berbeda apabila



Gambar 4. 6 Dampak STATCOM terhadap Kestabilan Frekuensi pada Bus Genload Tj Jati

dibandingkan dengan grafik pada saat STATCOM telah terpasang pada Bus Genload Tanjung Jati. Frekuensi dari bus menunjukkan grafik yang stabil. Apabila kita amati kembali dan coba dibandingkan dengan grafik tegangan maka dapat dilihat bahwa kenaikan dan osilasi yang terjadi pada frekuensi bus terjadi pada saat yang bersamaan dengan turunnya nilai tegangan dan osilasi yang terjadi pada Bus Genload Tanjung Jati. Sehingga dapat diamati bahwa penggunaan STATCOM selain dapat memulihkan tegangan dari sistem tetapi juga dapat untuk mempertahankan dari stabilitas frekuensi sistem saat terjadinya kontingensi.

Dampak dari pemasangan STATCOM sendiri selain dapat dilihat pada bus dimana STATCOM tersebut dipasang juga dapat dilihat pada Bus yang terletak berdekatan dengan bus tersebut. Pada sistem ini, Bus Tanjung Jati yang terletak berdekatan dengan Bus Genload Tanjung Jati dimana STATCOM dipasang juga mengalami perbaikan baik dari segi tegangan dan frekuensi dari Bus tersebut. Bahkan perbaikan juga dapat terlihat dari kondisi sudut rotor pada generator yang terhubung dengan Bus Tanjung Jati.



Gambar 4. 7 Grafik Dampak STATCOM pada Pemulihan Tegangan di Bus Tanjung Jati

Pada Gambar 4.7 dapat diamati perbedaan antara kondisi tegangan pada Bus Tanjung Jati ketika sebelum dan sesudah STATCOM terpasang pada sistem. Kondisi tegangan pada Bus Tanjung Jati pada saat terjadinya kontingensi serupa dengan kondisi pada Bus Genload Tanjung Jati dimana sistem dapat menahan tegangan untuk dapat berada pada batas stabilitas sampai pada saat $t=7,5$ detik tegangan tidak dapat bertahan dan turun hingga 0,6 pu dan dilanjutkan dengan terjadinya osilasi.

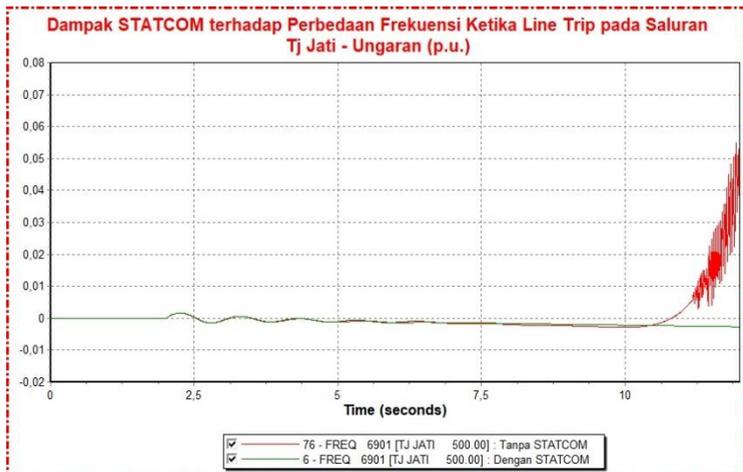
Perbandingan nilai tegangan bus dilihat lebih jelas pada tabel 4.4 dimana terlihat jelas STATCOM dapat memulihkan nilai tegangan pada Bus Tanjung Jati.

Tabel 4. 4 Perbandingan Kondisi Sebelum dan Sesudah STATCOM Terpasang pada Sistem Terhadap Bus Tanjung Jati

Kondisi Bus Tanjung Jati			
Tanpa STATCOM		Dengan STATCOM	
t (sekon)	v (pu)	t (sekon)	v (pu)
0	1,03	0	1,03
1	1,03	1	1,03
2	1,033	2	1,03
3	1,04	3	1,016
4	0,990	4	1,01
5	0,976	5	1,005
6	0,968	6	1,003
7	0,958	7	0,999
8	0,943	8	0,996
9	0,923	9	0,992
10	0,869	10	0,991
11	0,702	11	0,990
12	0,577	12	0,990

Pada bagian yang ditandai warna kuning pada tabel memperlihatkan kondisi tegangan pada sistem yang berada dibawah batas kestabilan tegangan. Bahkan untuk nilai tegangan ketika mencapai kondisi $t=12$ detik turun hingga 0,577 pu dimana berarti penurunan tegangan terjadi hingga 43,9%. Apabila kita bandingkan dengan nilai yang didapat setelah dilakukan pemasangan STATCOM pada Bus Genload Tj Jati, tegangan pada Bus Tanjung Jati menunjukkan bahwa tegangan masih pada batas stabilitas. Tegangan pada Bus Tanjung Jati mengalami penurunan sebesar 0,04 pu yaitu 3,88 %. Dari perbandingan grafik dan data setelah dilakukan analisis lebih jauh dapat dikatakan bahwa pengaruh dari STATCOM tidak hanya berdampak pada bus tempat STATCOM dipasang tetapi juga untuk bus yang berada di dekatnya.

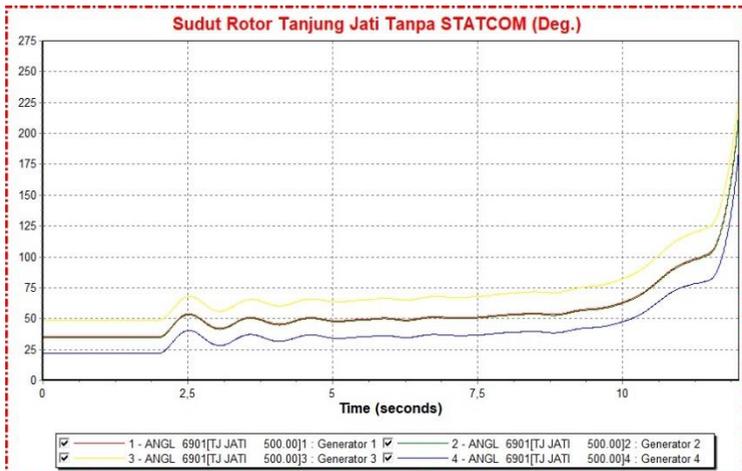
Hal lain yang dapat dijadikan indikator dalam melihat kestabilan sistem adalah frekuensi. Serupa dengan yang dilakukan pada analisis yang dilakukan pada kondisi Bus Genload Tj Jati, analisis terhadap perbandingan frekuensi sebelum dan sesudah pemasangan STATCOM juga dapat dilakukan pada Bus Tanjung Jati. Pada gambar 4.7 akan menampilkan grafik perbandingan dari kondisi frekuensi sebelum dan sesudah pemasangan STATCOM dilakukan.



Gambar 4. 8 Dampak STATCOM terhadap Kestabilan Frekuensi pada Bus Tanjung Jati

Grafik frekuensi yang dihasilkan dari hasil simulasi pada Bus Tanjung Jati memunculkan hasil yang serupa dengan hasil simulasi pada Bus Genload Tj Jati. Frekuensi dari bus dapat mempertahankan kestabilannya hingga pada saat $t= 10$ detik mulai terlihat adanya kenaikan frekuensi yang disertai dengan osilasi. Kondisi kenaikan dan osilasi tersebut tidak terjadi pada grafik frekuensi setelah dilakukan pemasangan STATCOM pada sistem. Dengan melihat kondisi ini dapat diartikan bahwa kemampuan dari STATCOM untuk dapat memperbaiki stabilitas dari tegangan dan frekuensi tidak hanya terbatas pada bus yang dipasang tetapi juga dengan Bus yang letaknya berdekatan.

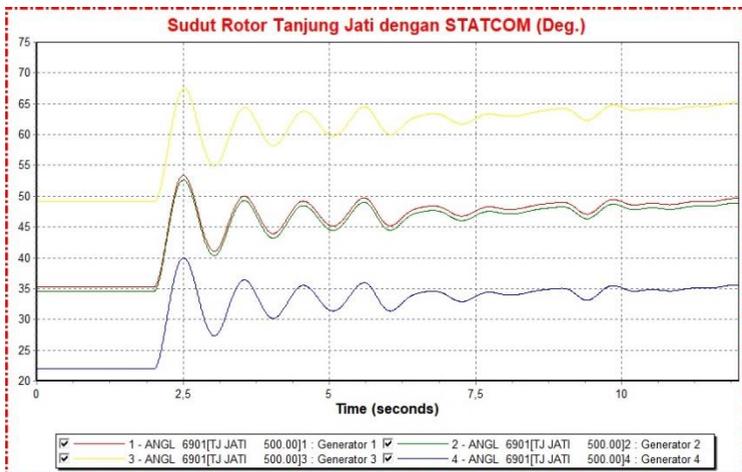
Selain stabilitas tegangan dan stabilitas frekuensi, kondisi Bus Tanjung Jati yang merupakan Bus pembangkit menyebabkan ada satu lagi indikator yang dapat diamati stabilitasnya, yaitu stabilitas sudut rotor dari generator pembangkit. Pada Pembangkit Tanjung Jati sendiri terdapat 4 generator dengan daya terbangkitkan mencapai 2278 MW. Sudut rotor pada saat terjadinya kontingensi juga terkena dampak yang menyebabkan sudut rotor menjadi tidak stabil. Kondisi dari kestabilan sudut rotor sebelum dan sesudah dilakukan pemasangan STATCOM dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10 agar dampak dari STATCOM dapat dibandingkan.



Gambar 4. 9 Grafik Sudut Rotor Sebelum Pemasangan STATCOM

Gambar 4.9 memperlihatkan stabilitas sudut rotor sebelum dilakukan pemasangan STATCOM. Pada saat terjadinya kontingensi, pada awalnya sudut rotor dapat bertahan untuk dapat stabil. Tetapi pada saat mencapai kondisi $t = 10$ detik, terjadi kenaikan pada sudut rotor hingga melewati 90 derajat. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya slip pada generator. Apabila besarnya nilai perbedaan sudut rotor dan slip yang terjadi pada generator tidak segera ditanggulangi, maka dapat mengakibatkan generator lepas sinkron.

Berikutnya dapat diamati kondisi stabilitas sudut rotor ketika setelah dilakukan pemasangan STATCOM. Dapat dilihat grafik yang ditunjukkan pada gambar 4.10 berbeda dengan grafik yang ditampilkan oleh gambar 4.9. pada gambar 4.10 kondisi sudut rotor dari generator tetap berada pada kondisi stabil dimana sudut rotor dari keempat generator tidak ada yang melebihi 90 derajat. Apabila dibandingkan dengan kondisi sudut rotor sebelum dilakukan pemasangan STATCOM dapat dilihat bahwa stabilitas sudut rotor juga mengalami perbaikan.



Gambar 4. 10 Grafik Sudut Rotor Sesudah Pemasangan STATCOM

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada tugas akhir yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan yaitu:

1. Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali (JAMALI) 500 kV telah terinterkoneksi dengan baik terbukti dengan apabila dilakukan simulasi dinamik untuk kejadian gangguan pada sistem, gangguan yang terjadi dapat ditopang oleh sistem dalam proses pemulihan kestabilannya kecuali pada saat kontingensi line trip n-1 pada saluran Bus Tanjung Jati – Ungaran.
2. Static Synchronous Compensator (STATCOM) dapat beroperasi menyerap daya reaktif (induktif) dan menyuplai daya reaktif (kapasitif) dengan menyesuaikan kebutuhan dari sistem.
3. STATCOM menjaga kestabilan transien sistem dengan menyuplai daya reaktif pada saat sumber terputus dari sistem akibat gangguan, sehingga setelah gangguan berakhir, kestabilan dari sistem dapat kembali hingga titik tertentu.
4. Dari hasil analisis yang dilakukan, kestabilan yang terbukti dapat dijaga dengan dilakukan pemasangan STATCOM adalah kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi, dan kestabilan sudut rotor pada sistem.
5. Dampak dari STATCOM tidak hanya memperbaiki Bus dimana dilakukan pemasangan tetapi juga berdampak pada bus lain yang letaknya berdekatan.

5.2 Saran

1. Mempertimbangkan untuk menambah saluran pada Bus Tanjung Jati yang terhubung dengan Sistem Interkoneksi JAMALI 500 kV demi meningkatkan keandalan dari sistem.
2. Mencoba untuk membandingkan dengan FACTS lain dalam hal performa memperbaiki stabilitas dari sistem.
3. Mempertimbangkan pemasangan STATCOM pada saluran transmisi untuk meningkatkan kemampuan dari sistem untuk

menjaga stabilitas dari sistem ketika terjadinya gangguan agar daya reaktif dapat terkompensasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Khan and S. Bhowmick, "STATCOM modeling for power flow analysis," *Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf. PIICON 2014*, no. June 2015, 2014.
- [2] H. P. Prayitno, O. Penangsang, N. K. Aryani, J. T. Elektro, and F. T. Industri, "Studi Perbaikan Stabilitas Tegangan Sistem Jawa - Madura - Bali (Jamali) dengan Pemasangan SVC Setelah Masuknya Pembangkit 1000 MW Paiton," vol. 5, no. 2, pp. 244–250, 2016.
- [3] V. Komoni, I. Krasniqi, G. Kabashi, and A. Alidemaj, "Increase power transfer capability and controlling line power flow in power system installed the FACTS," *7th Mediterr. Conf. Exhib. Power Gener. Transm. Distrib. Energy Convers. (MedPower 2010)*, no. January, pp. 193–193, 2010.
- [4] E. C. B. V., *Electrical Power System Essentials Pieter Schavemaker and Lou van der Sluis*, no. April 2008. 2016.
- [5] T. Gönen, *Electrical power transmission system engineering: analysis and design*, vol. 3, no. 2. 2009.
- [6] B. Raton, L. New, and Y. Washington, *Electrical distribution handbook Short*, no. C. 2004.
- [7] O. Penangsang, *Analisis Aliran Daya Pada Sistem Tenaga Listrik*. Surabaya, 2012.
- [8] X.F.Wang, *Modern Power System Analysis*. 2008.
- [9] P. Kundur, "Power System Stability And Control." McGraw-Hill, Inc., p. 1176, 1993.
- [10] M. Noroozian, N. A. Petersson, B. Thorvaldson, A. B. Nilsson, and C. W. Taylor, "Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application," *2003 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. (IEEE Cat. No.03CH37495)*, pp. 1143–1150.
- [11] P. Borse, A. G. Thosar, and S. Shaha, "Modeling and Simulation of STATCOM," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 3, no. 12, 2014.
- [12] B. P. Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtouz, *Flexible AC Transmission Systems Modelling and Control*. 2006.
- [13] T. L. Jawa-madura-bali, T. Lembaran, N. Republik, T. Lembaran, T. Lembaran, and N. Republik, "MENTERI

ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA,” 2007.

- [14] S. Industry, S. Power, and T. International, “PSS®E 33.3 Program Operation Manual,” p. 1502, 2012.
- [15] H. Voltage, D. Current, V. Source, H. Vsc, and F. Gl, “Grid Architectures for Offshore Energy Parks High Voltage Direct Current Voltage Source Converters (HVDC VSC) João Filipe Glória de Jesus Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores Júri Setembro de 2010 Ag,” 2010.
- [16] Siemens Power Technologies International, “PSSE 33.4 Model Library,” pp. 7–332, 2013.
- [17] C. Purohit, Apexa Suryakant Jani, “Operation and Control of STATCOM,” *IJSRD - Int. J. Sci. Res. Dev.*, vol. 1, no. 11, 2014.
- [18] G. Migliavacca, Ed., *Advanced Technologies for Future Transmission Grid*. 2013.
- [19] A. K. Deb, *Powerline Ampacity System: Theory, Modeling and Applications*. 2000.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
1	NEW SRLY	1,02	9,4	SRLYA	-290,4	-96
				LESTARI BNTN	429,2	105,7
				LESTARI BNTN	429,2	105,7
				LOAD NEW SRLY	0	0
2	SHUNT UNGAR	0,856	-29,3	3WNDTR UNGA	0	-73,4
3	GENLOAD TJJATI	1,017	15,7	TJ JATI	-124	-45
				TJ JATI	-124	-45
4	SRLYA	1,02	5	NEW SRLY	290,4	94,6
				LOAD SRLYA	116,1	62,5
				NEW BLRJA	593,7	73,8
				NEW BLRJA	593,7	73,8
				CILEGON	601,5	161,4
				CILEGON	601,5	161,4
5	SHUNT UNGAR	0,856	-29,3	3WNDTR UNGA	0	-73,4
6	LESTARI BNTN	1,02	5	NEW SRLYA	-429,2	-1,6
				NEW SRLYA	-429,2	-1,6
				NEW BLRJA	746,2	117,2
				NEW BLRJA	746,2	117,2
7	LOAD KESUGIH	1,03	7,8	KESUGIHAN	0	0

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
8	BEKASI	0,982	-1,8	GENLOAD BKS	171,6	66,1
				GENLOAD BKS	171,6	66,1
				LOAD BEKASI	139,5	83,4
				LOAD BEKASI	139,5	83,4
				CIBINONG	-703,9	-297,7
				CAWANG	81,7	-1,4
9	GENLOAD UNGA	0,94	4,5	3WNDTR UNGA	-286,5	-133
				3WNDTR UNGA	-286,5	-133
10	GENLOAD CBTU	0,852	-7,2	CIBATU	-315	-193
				CIBATU	-315	-193
11	MUARA TAWAR	0,988	-0,3	CIBINONG	-85	-101,7
				CAWANG	581,6	167
				CIBATU	359,2	178,2
				CIBATU	359,2	178,2
12	LOAD UNGAR	0,98	7,3	UNGERAN	-120	-250
13	SBY BARAT	0,963	10,2	GENLOAD SBY	232,6	192,5
				LOAD SBYBAR	326,7	158,8
				LOADSBYBAR	326,7	158,8
				NBANG	152,2	22,3
				GRESIK	-170,2	57,8
				GRESIK	-170,2	57,8
				GRATI	-488,2	-242
				GRATI	-488,2	-242
				UNGERAN	43,8	-239,4
				3WNDTR SBYB	234,7	75,4

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
14	GENLOAD SBYB	0,9616	6,4	SBY BARAT	-232,4	-167,4
				3WNDTR SBYB	-234,6	35,4
15	LOAD NEW SRLY	1,048	5	NEW SRLYA	0	0
16	LOAD SBYBAR	0,9865	5	SBY BARAT	-326,5	-123,5
				SBY BARAT	-326,5	-123,5
17	SHUNT SBYBAR	0,9084	-26,5	3WNDTR SBYB	0	-83,5
18	NBANG	0,9597	9,7	SBY BARAT	-152	-65,7
				LOAD NBANG	78	36
				GENLOAD NBAN	74	29,7
19	LOAD NBANG	1,0197	9,7	NBANG	-78	-34
20	GENLOAD NBAN	1,0154	8,6	NBANG	-74	-28
21	GRESIK	0,967	10,5	SBY BARAT	170,3	-79,5
				SBY BARAT	170,3	-79,5
				GENLOAD GRES	150,4	416,9
22	LOAD SRLYA	0,988	1,3	SRLYA	-116	-53
23	GENLOAD BKS	1,011	-4,5	BEKASI	-171,5	-57
				BEKASI	-171,5	-57
24	LOAD BEKASI	1,02	-3,9	BEKASI	-139,5	-76,5
				BEKASI	-139,5	-76,5
25	GENLOAD GRES	0,845	7,5	GRESIK	-150	-357

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
26	CIRATA	0,98	-1	GENLOAD CIRA	233,6	90,6
				GENLOAD CIRA	233,6	90,6
				SGLNG	-227,4	-214
				SGLNG	-227,4	-214
				CIBATU	157	76,6
				CIBATU	133,5	65,1
27	GENLOAD CIRA	0,956	-5,1	CIRATA	-233,5	-72
				CIRATA	-233,5	-72
28	SGLNG	0,987	-0,7	CIRATA	227,7	192,1
				CIRATA	227,7	192,1
				BDG SLTN	-57,5	12,9
				BDG SLTN	-57,5	12,9
				CIBINONG	-126,8	-100,1
				CIBINONG	-123,8	-98,5
29	BDG SLTN	0,986	-0,5	SGLNG	57,5	-49,8
				SGLNG	57,5	-49,8
				NEWUJBR	-363,5	-141
				MDCAN	-371,1	-139,3
				3WNDTR BDSLN	317,7	277,5
				3WNDTR BDSLN	301,8	102,3
30	GENLOA BDSLN	0,95	-5,9	3WNDTR BDSLN	-317,4	-224,8
				3WNDTR BDSLN	-301,6	-67,2

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
31	NEW BLRJA	1,01	2,7	SRLYA	-591,1	-115,5
				SRLYA	-591,1	-115,5
				LESTARI BNTN	-743,4	-138,2
				LESTARI BNTN	-743,4	-138,2
				LOAD NEWBLRJ	322,2	74,3
				LOAD NEWBLRJ	322,2	74,3
				LOAD BLRJA	285,2	51,6
				LOAD BLRJA	285,2	51,6
				GANDUL	727,1	127,8
				GANDUL	727,1	127,8
32	SHUNT BDSLN	0,9055	-40,2	3WNDTR BDSLN	0	0
33	LOAD NEWBLRJ	0,9808	-2,7	NEW BLRJA	-322	-43
				NEW BLRJA	-322	-43
34	SHUNT BDSLN	0,94	-39,8	3WNDTR BDSLN	0	0
35	DEPOK	0,998	0,4	GANDUL	-435,4	-165,9
				GANDUL	-435,4	-165,9
				LOAD DEPOK	252,6	23,5
				LOAD DEPOK	252,6	23,5
				TASIK	-356,1	-181,8
				TASIK	-356,1	-181,8
				CIBINONG	538,8	224,6
				CIBINONG	538,8	224,6

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
36	GRATI	0,99	13,1	SBY BARAT	490,9	182,5
				SBY BARAT	490,9	182,5
				GENLOAD GRAT	281,7	155,2
				GENLOAD GRAT	281,7	155,2
				PAITON	-639,6	-313,6
				PAITON	-639,6	-313,6
37	LOAD BLRJA	0,97	-2,2	NEW BLRJA	-285	-27
				NEW BLRJA	-285	-27
38	GANDUL	1	0,6	NEW BLRJA	-724,1	-146,8
				NEW BLRJA	-724,1	-146,8
				DEPOK	435,5	160,2
				DEPOK	435,5	160,2
				GENLOAD GAND	124	15
				GENLOAD GAND	124	15
				LOAD GANDUL	174,1	88,3
				KMBGN	51,7	-48
				KMBGN	51,7	-48
				KMBGN	51,7	-48
39	GENLOAD GRAT	1,02	8,9	GRATI	-281,5	-129
				GRATI	-281,5	-129
40	GENLOAD GAND	0,99	-1,4	GANDUL	-124	-10,5
				GANDUL	-124	-10,5

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
41	LOAD GANDUL	1	-2,2	GANDUL	-174	-78
42	KMBGN	1	0,5	GANDUL	-51,7	18
				GANDUL	-51,7	18
				GANDUL	-51,7	18
				GENLOA KMBG	77,5	-27
				GENLOA KMBG	77,5	-27
43	GENLOA KMBG	0,99	-0,8	KMBGN	-77,5	29
				KMBGN	-77,5	29
44	LOAD DEPOK	1,02	-3,6	DEPOK	-252,5	-6
				DEPOK	-252,5	-6
45	TASIK	1,028	6,5	DEPOK	360,3	-63,5
				DEPOK	360,3	-63,5
				LOAD TASIK1	61	37,3
				LOAD TASIK2	62	32,3
				KESUGIHAN	-421,8	-77,2
				KESUGIHAN	-421,8	-77,2
46	CILEGON	1,018	4,6	SRLYA	-601,1	169,6
				SRLYA	-601,1	169,6
				LOAD CILEGON	174,1	-24,5
				GENLOAD CILE	228,6	142,5
				GENLOAD CILE	228,6	142,5
				CIBINONG	570,8	78,6

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
47	LOAD TASIK1	1,03	4,6	TASIK	-61	-36
48	LOAD CILEGON	1,026	1,8	CILEGON	-174	33
49	LOAD TASIK2	1,03	5,6	TASIK	-62	-31
50	GENLOAD CILE	1,0359	1,2	CILEGON	-228,5	-124,5
	CILEGON			-228,5	-124,5	
51	CIBINONG	0,99	-0,1	BEKASI	706,6	286,2
				MUARA TAWAR	85,1	52,5
				SGLNG	126,9	22,2
				SGLNG	123,9	20,4
				DEPOK	-538,3	-233,1
				DEPOK	-538,3	-233,1
				CILEGON	-566,4	-163,5
				LOAD CIBINON	269,3	282,7
				GENLOAD CIBI	165,6	-17,1
				GENLOAD CIBI	165,6	-17,1
52	LOAD CIBINON	0,99	-4,3	CIBINONG	-269	-244
53	ADIPALA	1,04	8,1	CILACAP	-328	-59,7
				CILACAP	-328	-59,7
				KESUGIHAN	328	59,7
				KESUGIHAN	328	59,7

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
54	CAWANG	0,98	-1,9	BEKASI	-81,7	-14,6
				MUARA TAWAR	-579,7	-189,2
				LOAD CAWANG	104	82,3
				GENLOA CAWA	278,7	60,8
				GENLOA CAWA	278,7	60,8
55	GENLOAD CIBI	1,0375	-2,6	CIBINONG	-165,6	24,5
				CIBINONG	-165,6	24,5
56	CILACAP	1,04	8,1	ADIPALA	328	54,5
				ADIPALA	328	54,5
57	LOAD CAWANG	0,96	-3,7	CAWANG	-104	-77
58	GENLOA CAWA	0,96	-6,7	CAWANG	-278,5	-36,5
				CAWANG	-278,5	-36,5
59	PEDAN	1	9,2	KEDIRI	-169,5	-109,4
				KEDIRI	-169,5	-109,4
				LOAD PEDAN	325,7	143,7
				LOAD PEDAN	325,7	143,7
				UNGERAN	0	-38,3
				UNGERAN	-503,3	288,8
				KESUGIHAN	95,4	-250
				KESUGIHAN	95,4	-250

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
54	CAWANG	0,98	-1,9	BEKASI	-81,7	-14,6
				GENLOAD CBTU	315,3	240,1
				MUARA TAWAR	-358,3	-215,6
				MUARA TAWAR	-358,3	-215,6
				CIRATA	-156,9	-123,7
				CIRATA	-133,4	-110
				LOAD CIBATU	188,1	92,4
				LOAD CIBATU	188,1	92,4
61	KEDIRI	1	11,4	PEDAN	170,1	-91,2
				PEDAN	170,1	-91,2
				PAITON	-397,2	-148,5
				PAITON	-397,2	-148,5
				LOAD KEDIRI	0,6	0,2
				LOAD KEDIRI	172,4	65,8
				GENLOAD KDR	140,6	101
				GENLOAD KDR	140,6	101
62	NEWUJBRG	0,99	4,4	BDG SLTN	364	111,3
				MDCAN	-364	-111,3
				LOAD NEWUJBR	0	0
				GENLO NEWUJ	0	0

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
63	PAITON	1,03	16,5	GRATI	643,9	270,3
				GRATI	643,9	270,3
				KEDIRI	400,5	-34,5
				KEDIRI	400,5	-34,5
				GENLOAD PAIT	198,1	30,8
				GENLOAD PAIT	198,1	30,8
				LOAD PAITON	246,1	41,3
64	MDCAN	1,005	3,1	BDG SLTN	373,6	10,4
				NEW UJBRG	365,9	7,7
				GENLOAD MDCA	48	25,4
				GENLOAD MDCA	48	25,4
				UNGARAN	-417,8	-34,5
				UNGARAN	-417,8	-34,5
65	LOAD PEDAN	0,99	4	PEDAN	-325,5	-109,5
				PEDAN	-325,5	-109,5
66	LOAD KEDIRI	1	11,4	KEDIRI	-0,6	-0,2
				KEDIRI	-172,4	-65,8
67	LOAD CIBATU	1,0023	-4,4	CIBATU	-188	-80,5
				CIBATU	-188	-80,5
68	GENLOA KEDIRI	1,006	9,2	KEDIRI	-140,5	-93
				KEDIRI	-140,5	-93

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
69	LOAD NEWUJBR	0,9925	0,3	NEW UJBRG	0	0
70	GENLOA NEWU	0,99	0,3	NEW UJBRG	0	0
71	GENLOAD MDCA	0,97	2,3	MDCAN	-48	-24,5
				MDCAN	-48	-24,5
72	UNGERAN	1	9,2	LOAD UNGAR	120,2	272,8
				SBY BARAT	-43,4	-17,5
				PEDAN	0	-38,3
				PEDAN	503,3	-288,8
				MDCAN	422,4	-147,2
				MDCAN	422,4	-147,2
				TJ JATI	-999,3	-79,1
				TJ JATI	-999,3	-79,1
				3WNDTR UNGA	286,7	262,2
				3WNDTR UNGA	286,7	262,2
73	TJ JATI	1,03	17,6	GENLOAD TJJATI	124	49,8
				GENLOAD TJJATI	124	49,8
				UNGERAN	1015	89,5
				UNGERAN	1015	89,5

Lanjutan lampiran 1. Hasil Simulasi Power Flow

No. Bus	Bus Pengirim	Tegangan		Bus Penerima	Daya Saluran	
		Volt (PU)	Angle (Deg)		MW	Mvar
74	GENLOAD PAIT	1,02	13,4	PAITON	-198	-20
				PAITON	-198	-20
75	LOAD PAITON	1,03	12,8	PAITON	-246	-25
76	KESUGIHAN	1,03	7,8	LOAD KESUGIH	0	0
				TASIK	422,7	30,2
				TASIK	422,7	30,2
				ADIPALA	-	-74,7
				ADIPALA	327,8	-74,7
				PEDAN	-94,8	44,5
				PEDAN	-94,8	44,5

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Anugerah Akbar Setiyawan, merupakan anak kedua dari dua bersaudara. Dilahirkan pada 26 Juni 1997 di Kota Surabaya oleh pasangan Bapak Atok Setiyawan dengan Ibu Nurlita Abdulgani. Mengawali jenjang pendidikan di SDI Al Azhar 11, Surabaya sampai dengan 2009 kemudian penulis melanjutkan pendidikan menengahnya di SMP Negeri 1 Surabaya sampai dengan 2012 dan melanjutkan pendidikan menengah atasnya di SMA Negeri 5 Surabaya hingga lulus pada tahun 2015. Sejak tahun 2015 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, bidang studi Teknik Sistem Tenaga, melalui jalur SNMPTN 2015. Selama menempuh pendidikan di ITS, penulis aktif di keorganisasian ITS yaitu BEM FTI ITS, Tim Kaderisasi HIMATEKTRO ITS, dan Tim Event HIMATEKTRO ITS. Berbagai kepanitiaan juga diikuti penulis hingga penulis. Penulis juga aktif dalam kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat. Penulis dapat dihubungi melalui email anugerahakbar@icloud.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan