



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE184801

**FENOMENA *POWER SWING* PADA SISTEM *BACKBONE* JAWA
BALI 500 KV DAN MITIGASINYA**

Restu Maulana Azmi
NRP. 0711154000046

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

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE184801

**POWER SWING PHENOMENON ON JAWA BALI 500 KV
BACKBONE AND ITS MITIGATION**

Restu Maulana Azmi
NRP. 0711154000046

Advisors

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc, Ph.D.

Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “FENOMENA *POWER SWING* PADA SISTEM BACKBONE JAWA BALI 500 KV DAN MITIGASINYA” 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, Juni 2019



Restu Maulana Azmi
NRP. 0711154000046

Halaman ini sengaja dikosongkan.

**FENOMENA POWER SWING PADA SISTEM BACKBONE JAWA
BALI 500 KV DAN MITIGASINYA**

TUGAS AKHIR

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

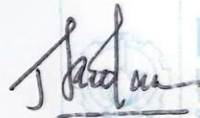
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



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

Dosen Pembimbing II



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



Halaman ini sengaja dikosongkan.

Fenomena *Power swing* pada Sistem Backbone Jawa Bali 500 kV dan Mitigasinya

Nama : Restu Maulana Azmi
NRP : 0711154000046
Dosen Pembimbing I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph D.
Dosen Pembimbing II : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ABSTRAK

Seiring berkembangnya zaman, kebutuhan tenaga listrik akan semakin besar. Hal ini menuntut adanya pengembangan sistem tenaga listrik, salah satunya dari sisi transmisi. Pengembangan sistem akan menyebabkan sistem kelistrikan semakin besar dan kompleks. Namun, semakin besar dan kompleks sebuah sistem, semakin besar pula peluang terjadinya gangguan, baik gangguan kecil maupun gangguan besar. Gangguan besar ini dapat menyebabkan terjadinya fenomena *power swing*. Fenomena *power swing* merupakan fenomena terjadinya osilasi aliran daya aktif dan daya reaktif pada saluran transmisi sebagai akibat adanya gangguan besar pada sistem. Beberapa dampak dari fenomena *power swing* adalah menyebabkan kesalahan trip pada relay jarak dan terjadinya *out-of-step* pada generator, sehingga sangat memungkinkan terjadinya blackout pada sistem. Untuk mencegah terjadinya hal tersebut, pada relay jarak modern terdapat fungsi PSB (*Power swing Blocking*) yang bersifat prediktif dalam menentukan nilai V dan I. Namun, pada tugas akhir ini, akan dibahas mengenai mitigasi untuk mengurangi dampak *Power swing* dengan metode penambahan FACTS *Device* dan penambahan sirkuit. Metode penyelesaian mitigasi ini menggunakan simulasi pada *software* DIgSILENT Power Factory, sedangkan pemodelan sistem yang digunakan adalah sistem *backbone* Jawa Bali 500 kV, sehingga diharapkan mendapat permodelan yang sesuai dengan kondisi lapangan. **Kata kunci** – *Power swing, FACTS Device, TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), Transmisi 500 kV.*

Halaman ini sengaja dikosongkan.

***Power swing* Phenomenon on Jawa Bali 500 kV Backbone and Its Mitigation**

Name : Restu Maulana Azmi
ID Number : 0711154000046
Supervisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang M.Sc, Ph D.
Supervisor II : Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ABSTRACT

As the era grows, the need for electricity will be greater. Its requires the development of power systems, one of them is from the transmission side. System development will cause the electrical system to become larger and more complex. However, the bigger and more complex a system is, the greater the chances of disturbance, both minor and major disturbance. This major disorder can cause *power swing* phenomenon. *Power swing* phenomenon is the phenomenon of active and reactive power flow oscillation in transmission line as a result of large disturbance in the system. Some of the impact of *power swing* phenomenon is may cause trip errors on the relay distance and out-of-step in the generator, so it is possible to be a blackout case in the system. In order to prevent this occurrence, the modern range relay is equipped with *Power swing* Blocking (PSB), which determines V and I values predictively. However, at this final task, it will be discussed about the mitigation to reduce the impact of *power swing* with the method of adding FACTS *Device* and the addition of transmission lines. This method of mitigation is using simulations in the DIGSILENT Power Factory *software*, while the system modeling used is the backbone of Java's Bali 500 kV system, so it is expected to get a modelling that suits with the real conditions.

Keywords – *Power swing*, FACTS *Device*, TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), Transmisi 500 kV.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan berkat, kasih dan anugerah-Nya semata, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul " Fenomena *Power swing* pada Sistem Backbone Jawa Bali 500 kV dan Mitigasinya" dengan lancar, baik dan tepat waktu.

Adapun pembuatan Tugas Akhir ini ditujukan sebagai salah satu syarat yang harus dipenuhi untuk menuntaskan studi sebagai mahasiswa SI Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini, penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu, penulis mengucapkan terimakasih kepada

1. Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmatnya kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan.
2. Kedua orang tua dan kakak – kakak penulis yang tak pernah lelah memberikan dukungan dari segi apapun kepada penulis dan tak henti-hentinya berdoa demi keberhasilan penulis.
3. Prof. Ontoseno Penangsang dan Ibu Ni Ketut Aryani selaku Dosen Pembimbing, terima kasih atas segala bimbingan, perhatian, dan arahan selama pengerjaan Tugas Akhir.
4. Pak Dimas Fajar Uman P dan Prof. Adi Soeprijanto yang selalu bersedia untuk berdiskusi dan diminta pendapatnya selama pengerjaan tugas akhir ini.
5. Bapak dan Ibu dosen pengajar Teknik Elektro ITS yang telah banyak memberikan materi, bersedia berbagi ilmu pengetahuan dan pengalaman berguna kepada penulis.
6. Nurul Aini S yang telah menemani, memberi motivasi dan semangat, dan mendengarkan keluh kesah penulis selama ini.
7. Bani ETAB (Baihaqi, Hotang, Arba, Miftah, Saad, Mas Kipot, Cece, Elva, Eunike, Fira, Mbak Farida) yang telah mengisi hari – hari penulis selama di PSSSL

8. NOAH dengan lagu – lagunya yang selalu menemani penulis dalam pengerjaan tugas akhir ini.

Akhirnya, penulis menyadari bahwa dalam penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka oleh saran dan amsukan yang bersifat membangun agar penulis dapat menghasilkan karya yang lebih baik di masa yang akan datang

Surabaya, Mei 2019

Penulis

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR, GRAFIK, DAN DIAGRAM	xiii
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Tugas Akhir	3
1.4. Batasan Masalah	3
1.5. Metodologi Penelitian	3
1.6. Sistematika Penulisan	4
1.7. Relevansi atau Manfaat	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1. Sistem Tenaga Listrik	7
2.2. Analisa Aliran Daya	7
2.3. Analisa Hubung Singkat	8
2.4. Analisa Kestabilan	9
2.4.1 Kestabilan Tegangan	9
2.4.2 Kestabilan Frekuensi	10
2.4.3 Kestabilan Sudut Rotor	10
2.5 Relay Jarak	11
2.6 <i>Power swing</i>	14
2.7 <i>FACTS Device</i>	16
2.7.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)	17
2.8 Standar yang Digunakan	20
2.8.1 Standar Tegangan	20
2.8.2 Standar Frekuensi	20
BAB III METODOLOGI PENELITIAN DAN PEMODELAN SISTEM	23
3.1 Metodologi Penelitian	23

3.2	Pemodelan Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV	26
3.3	Pemodelan <i>Setting</i> Relay Jarak	33
3.4	Pemodelan TCSC	39
BAB IV	SIMULASI DAN ANALISIS	43
4.1	Analisa Kondisi Eksisting	43
4.1.1	Simulasi <i>Load flow</i>	44
4.1.2	Simulasi Hubung Singkat	49
4.2	Simulasi Gangguan	49
4.2.1	Fenomena <i>Power swing</i>	50
4.2.2	Dampak <i>Power swing</i>	53
4.3	Mitigasi Gangguan.....	58
4.3.1	Pemasangan TCSC.....	58
4.3.2	Pemasangan TCSC dan Intertrip Reaktor	65
4.3.3	Penambahan Saluran Paiton – Surabaya Barat dan Penerapan OFGS (<i>Over Frequency Generator Shedding</i>).....	70
4.3.4	Penambahan Saluran Bangil – Grati dan OFGS (<i>Over Frequency Generator Shedding</i>)	75
4.3.5	Rangkuman Hasil Mitigasi	81
BAB V	PENUTUP	83
5.1	Kesimpulan.....	83
5.2	Saran	83
DAFTAR PUSTAKA	85
LAMPIRAN	87
BIOGRAFI	89

DAFTAR GAMBAR, GRAFIK, DAN DIAGRAM

Gambar 2.1.	Komponen sistem tenaga listrik.....	7
Gambar 2.2.	Sudut rotor pada generator	11
Gambar 2.3.	Struktur penyusunan relay jarak pada sistem	12
Gambar 2.4.	Karakteristik <i>time-distance</i> untuk skema proteksi tiga zona	13
Gambar 2.5.	Osilasi daya aktif pada saluran transmisi	15
Gambar 2.6.	Pemodelan TCSC pada sistem transmisi.....	17
Gambar 2.7.	Blok diagram kontroller TCSC.....	18
Gambar 2.8.	Pemodelan blok diagram kontroller TCSC di <i>DIGSILENT PowerFactory</i>	18
Gambar 2.9.	Tongkat frekuensi sistem Jawa Bali	21
Gambar 3.1.	Diagram alir metodologi penelitian	24
Gambar 3.2.	<i>Single line diagram</i> sistem Jawa Bali 500kV	27
Gambar 3.3.	Karakteristik <i>time-distance</i> untuk skema proteksi tiga zona	33
Gambar 3.4.	Topologi jaringan yang dilakukan pemodelan setting relay jarak	34
Gambar 3.5.	Karakteristik mho relay jarak Paiton - Kediri 1 & 2..	35
Gambar 3.6.	Karakteristik mho relay jarak Kediri - Paiton 1 & 2..	36
Gambar 3.7.	Karakteristik mho relay jarak Kediri - Pedan 1 & 2..	36
Gambar 3.8.	Karakteristik mho relay jarak Pedan - Kediri 1 & 2..	36
Gambar 3.9.	Karakteristik mho relay jarak Paiton - Grati 1 & 2....	37
Gambar 3.10.	Karakteristik mho relay jarak Grati - Paiton 1 & 2....	37
Gambar 3.11.	Karakteristik mho relay jarak Pedan - Kesugihan 1 & 2	38
Gambar 3.12.	Karakteristik mho relay jarak Kesugihan - Pedan 1 & 2	38
Gambar 3.13.	<i>Composite Frame</i> TCSC menggunakan DSL	39
Gambar 3.14.	Blok kontroller TCSC menggunakan DSL	39
Gambar 3.15.	<i>Script initial condition</i> dan <i>variable definition</i> kontroller TCSC.....	40
Gambar 3.16.	Blok kontroller uPOD menggunakan DSL	40
Gambar 3.17.	<i>Script initial condition</i> dan <i>variable definition</i> kontroller uPOD.....	41
Gambar 4.1.	Grafik tegangan bus kondisi eksisting	44
Gambar 4.2.	Aliran daya sistem Paiton pada kondisi eksisting.....	48
Gambar 4.3.	Plot Tegangan bus setelah kontingensi N-1-1	51

Gambar 4.4.	Aliran daya Paiton – Kediri setelah kontingensi N-1-1.	51
Gambar 4.5.	Plot respon sudut rotor dan frekuensi sistem	52
Gambar 4.6.	Plot frekuensi dan urutan kejadian	53
Gambar 4.7.	Respon sudut rotor kit Paiton.....	54
Gambar 4.8.	Respon tegangan sistem setelah gangguan N-1-1 Paiton – Grati	55
Gambar 4.9.	<i>Trajectory</i> impedansi yang terbaca oleh relay jarak ..	55
Gambar 4.10.	Respon logic relay jarak di cubicle Kediri untuk saluran Kediri-Pedan	56
Gambar 4.11.	Respon kecepatan putar kit Paiton	57
Gambar 4.12.	Topologi sistem dengan pemasangan TCSC	58
Gambar 4.13.	<i>Interface</i> untuk mengisi parameter control TCSC pada DIgSILENT.....	60
Gambar 4.14.	<i>Interface</i> untuk mengisi parameter control uPOD pada DIgSILENT.....	61
Gambar 4.15.	Respon frekuensi sistem setelah kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati dengan pemasangan TCSC.....	62
Gambar 4.16.	Aliran daya saluran Paiton-Kediri setelah kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati dengan pemasangan TCSC	63
Gambar 4.17.	Respon sudut rotor kit Paiton dan pembangkit besar .	63
Gambar 4.18.	Grafik tegangan kondisi eksisting dan sesudah kontingensi dengan dilakukan pemasangan TCSC	64
Gambar 4.19.	Plot respon tegangan bus setelah kontingensi dengan pemasangan TCSC	65
Gambar 4.20.	Respon frekuensi sistem dengan pemasangan TCSC dan intertrip reaktor.....	67
Gambar 4.21.	Respon sudut rotor kit Paiton dan pembangkit – pembangkit besar.....	68
Gambar 4.22.	Respon tegangan setelah pemasangan TCSC dan intertrip reaktor.....	69
Gambar 4.23.	Grafik tegangan sebelum kontingensi, tegangan mitigasi 1, dan tegangan mitigasi 2	69
Gambar 4.24.	Topologi sistem dengan penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat	70
Gambar 4.25.	Respon frekuensi setelah penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat	71

Gambar 4.26.	Tegangan sebelum dan sesudah penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat	72
Gambar 4.27.	Pengaturan relay OFGS (Over Frequency Generator Shedding).....	73
Gambar 4.28.	Respon frekuensi sistem setelah penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat dan OFGS	73
Gambar 4.29.	Tegangan sistem setelah penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat dan OFGS	74
Gambar 4.30.	Topologi jaringan dengan penambahan saluran Bangil - Grati.....	75
Gambar 4.31.	Respon frekuensi sistem setelah penambahan saluran Bangil – Grati	76
Gambar 4.32.	Respon sudut rotor kit Paiton dan pembangkit – pembangkit besar	76
Gambar 4.33.	Grafik tegangan sebelum dan sesudah mitigasi.....	77
Gambar 4.34.	Setting relay OFGS	78
Gambar 4.35.	Respon frekuensi sistem setelah penambahan saluran Bangil – Grati dan OFGS	78
Gambar 4.36.	Respon tegangan bus setelah penambahan saluran Bangil – Grati dan OFGS	79
Gambar 4.37.	Grafik perbandingan tegangan antara kondisi sebelum gangguan, mitigasi 4a, dan mitigasi 4b.....	79
Gambar 4.38.	Respon sudut rotor kit Paiton dan pembangkit – pembangkit besar	80
Gambar 4.39.	Aliran daya saluran Paiton – Bangil	80

Halaman ini sengaja dikosongkan.

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1.	Penyebab dan dampak gangguan	15
Tabel 2.2.	Standar tegangan operasi sistem Jawa Bali	20
Tabel 3.1.	Beban dan pembangkitan tiap bus	28
Tabel 3.2.	Beban dan pembangkitan tiap bus (lanjutan)	29
Tabel 3.2.	Karakteristik saluran transmisi Jawa Bali 500 kV	30
Tabel 3.3.	Setting relay jarak tiap cubicle	34
Tabel 4.1.	Aliran daya pada saluran transmisi	45
Tabel 4.2.	Nilai arus hubung singkat tiap bus	49
Tabel 4.3.	Urutan event pada simulasi	50
Tabel 4.4.	Karakteristik saluran Paiton - Kediri	59
Tabel 4.5.	Urutan event pada simulasi	62
Tabel 4.6.	Reaktor yang terpasang pada sistem Jawa Bali	66
Tabel 4.7.	Reaktor yang aktif (<i>in service</i>)	67
Tabel 4.8.	Rangkuman hasil mitigasi	81

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Seiring berkembangnya zaman, kebutuhan akan tenaga listrik akan semakin besar. Hal ini akan menuntut adanya pengembangan sistem tenaga listrik, salah satunya dari sisi transmisi. Pengembangan sistem akan menyebabkan sistem kelistrikan semakin besar dan kompleks. Sistem Jawa Bali 500 kV merupakan sebuah sistem transmisi besar yang menghubungkan seluruh wilayah di Pulau Jawa dan Bali yang saling terinterkoneksi. Sistem ini menjadi tulang punggung sistem kelistrikan di Pulau Jawa dan Pulau Bali, dimana sistem ini digunakan sebagai media untuk melakukan transfer daya antar region (wilayah). Sistem Jawa Bali 500kV diprediksikan akan menopang beban yang semakin besar tiap tahunnya, sehingga diharapkan memiliki fleksibilitas, keandalan, dan stabilitas yang baik. Dalam operasi sistemnya, terkadang sistem Jawa Bali dioperasikan pada kondisi yang hampir mendekati limit kemampuannya dalam mempertahankan kestabilan dan sinkronisasi antar mesin. Sehingga, ketika terjadi gangguan dapat mempengaruhi kestabilan sistem. Gangguan tersebut dapat, *switching* saluran, pelepasan generator, parallel generator, penambahan beban, pelepasan beban, dan hubung singkat pada saluran. Secara lebih rinci, gangguan gangguan tersebut dapat menyebabkan, hilangnya sinkron antara tegangan, antara urutan fase, antara sudut fase, dan antara frekuensi. Apabila gangguan tersebut terjadi secara masif, gangguan tersebut dapat memicu terjadinya fenomena *power swing* pada saluran transmisi. *Power swing* merupakan fenomena terjadinya osilasi aliran daya aktif dan reaktif pada saluran transmisi akibat gangguan besar pada sistem.

Jika gangguan ini tidak dapat di blok, dapat menyebabkan kesalahan trip pada relay jarak. Pada saat terjadi *power swing*, osilasi daya aktif dan reaktif mengakibatkan sudut tegangan pada saluran transmisi berubah, sehingga impedansi yang terukur oleh relay jarak berubah. Jika *trajectory* perubahan impedansi ini melewati area kerja relay jarak, relay jarak akan mendeteksi hal ini sebagai gangguan. Sehingga relay jarak

akan memberi instruksi untuk melakukan trip pada saluran. Padahal normalnya, relay jarak tidak akan trip pada kondisi dinamis, baik itu *power swing* stabil maupun tidak stabil.

FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*) *Device* merupakan perangkat elektronika daya yang digunakan pada saluran transmisi sebagai kompensator yang dapat berubah-ubah nilainya. FACTS *Device* pada dasarnya terdiri dari kapasitor dan reaktor. Kedua komponen ini bertindak sebagai kompensator yang dapat mengatur reaktansi saluran transmisi. Dengan kemampuannya yang dapat mengubah reaktansi saluran, FACTS dapat menjadikan sistem transmisi menjadi lebih fleksibel, meningkatkan kemampuan pembebanan (*loadability*), dan meningkatkan kestabilan sistem. FACTS *Device* memiliki beberapa jenis, antara lain TCSC, STATCOM, UPFC, SVC, dll.

Pada tugas akhir ini, dilakukan mitigasi dengan pemasangan TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) pada saluran transmisi. TCSC terdiri dari kapasitor yang diparalel dengan reaktor yang terkontrol oleh thyristor. Hasil paralel kedua komponen ini akan dihubungkan secara seri dengan saluran yang akan diatur reaktansinya. Pemilihan FACTS *Device* jenis ini dikarenakan salah satu sifat dari TCSC adalah kemampuannya untuk meredam osilasi ketika pada periode transien. Selain itu, TCSC dapat meningkatkan kemampuan transfer daya pada saluran, sehingga tingkat kestabilan akan meningkat.

Pada tugas akhir ini juga akan dilakukan mitigasi dengan penambahan saluran transmisi. Dengan penambahan saluran transmisi, diharapkan dapat meningkatkan kestabilan sistem.

1.2. Perumusan Masalah

Dalam melakukan mitigasi untuk mengatasi dampak dari fenomena *power swing* pada sistem Jawa Bali 500 kV, dibutuhkan pemodelan solusi yang tepat dengan memperhatikan kemampuan sistem untuk menjaga kestabilannya, ketepatan trip pada relay jarak, dan memastikan parameter-parameter operasi sistem tenaga listrik sesuai standar operasi sistem Jawa Bali.

1.3. Tujuan Tugas Akhir

Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk memberikan rekomendasi mitigasi yang dapat dilakukan untuk mengatasi dampak *power swing*, sehingga sistem tetap dapat menjaga kestabilannya dan parameter-parameter sistem tenaga tetap beroperasi sesuai standar.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah :

1. Simulasi dan permodelan sistem menggunakan perangkat lunak DIgSILENT Power Factory 15.1
2. Permodelan setting relay jarak menggunakan metode 3 zona sebagaimana tercantum dalam referensi [1]
3. Analisa *power swing* dilakukan pada sistem Paiton dan saluran-saluran yang terkait (Paiton-Grati, Paiton-Kediri, Kediri-Pedan, Pedan-Kesugihan, Grati-Surabaya Barat)
4. Jenis FACTS yang digunakan adalah TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*)
5. Data yang digunakan berdasarkan data yang diperoleh dari PLN P2B tahun 2018
6. Data parameter generator tidak ditampilkan dalam tugas akhir ini karena dikategorikan kedalam restricted data

1.5. Metodologi Penelitian

Dalam pengerjaan dan penyusunan tugas akhir ini menggunakan metodologi sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan berdasarkan jurnal, prosiding dan text book yang berisi mengenai teori pendukung mengenai *power swing*, FACTS *Device*, TCSC, relay jarak, serta standar-standar yang digunakan.

2. Pengumpulan data

Pengumpulan data didapat dari PLN dan beberapa sumber lainnya. Data yang dibutuhkan berupa data generator, data saluran, dan data beban, standarisasi parameter. Data generator berupa

kapasitas generator, impedansi generator, model dinamik generator (AVR dan Governor). Data saluran berupa data impedansi, jarak dan kapasitas saluran. Data beban berupa rating dan jenis beban.

3. Permodelan sistem

Permodelan sistem menggunakan *software* DIGSILENT Power Factory berupa permodelan *plant*, permodelan FACTS *device*, permodelan sistem proteksi relay jarak, dengan batasan batasan yang telah ditentukan, dan memberikan variable pada sisi pengontrolan FACTS *device*.

4. Simulasi dan analisis

Simulasi dilakukan secara bertahap, yakni pertama pada kondisi operasi normal. Kedua, ditambahkan skenario gangguan - gangguan yang dapat memicu terjadinya *power swing*. Kemudian dilakukan simulasi dengan mengaplikasikan rekomendasi dari hasil mitigasi.

5. Penyusunan laporan

Hasil analisis dan kesimpulan dari penelitian ini dilaporkan dalam bentuk laporan tugas akhir sebagai jawaban dari perumusan masalah dan tujuan tugas akhir. Selain itu ditambahkan saran dan rekomendasi untuk pengembangan selanjutnya.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada tugas akhir ini terdiri dari lima bab, dimana pokok bahasan tiap babnya adalah sebagai berikut :

1. BAB I

Bab I merupakan pendahuluan yang membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi yang digunakan, sistematika penulisan, dan relevansi dari tugas akhir

2. BAB II

Bab II merupakan tinjauan pustaka yang membahas tentang studi literatur terkait sistem tenaga listrik, analisa kestabilan, *power swing*, relay jarak, dan FACTS *Device*

3. BAB III

Bab III membahas tentang langkah langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini dan proses pemodelan sistem yang akan dijadikan objek penelitian.

4. BAB IV

Bab IV merupakan analisa atas hasil simulasi, dimana akan dilakukan analisa untuk setiap mitigasi yang diujicobakan untuk mengatasi fenomena *power swing*.

5. BAB V

Bab V menjelaskan tentang kesimpulan atas hasil simulasi dan analisa hasil simulasi. Selain itu juga akan dijelaskan tentang saran yang bisa menjadi bahan perbaikan untuk Tugas Akhir selanjutnya dengan topik terkait.

1.7. Relevansi atau Manfaat

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat, antara lain:

1. Dapat menambah wawasan mengenai permasalahan - permasalahan dalam sistem transmisi tenaga listrik khususnya fenomena *power swing*
2. Dapat meningkatkan wawasan dalam pengaplikasian teknologi pada sistem tenaga
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa / akademisi untuk melakukan penelitian dengan topik terkait

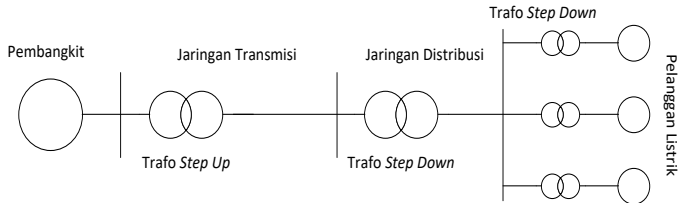
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem terinterkoneksi yang terdiri dari pembangkitan, transmisi, distribusi, dan beban yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan listrik pelanggan (beban) [2]



Gambar 2.1. Komponen sistem tenaga listrik

Pembangkitan adalah proses dimana daya terbangkitkan. Umumnya pembangkit menggunakan generator AC tiga fasa. Pada generator terdapat sistem eksitasi yang berfungsi untuk mengontrol tegangan dan daya reaktif [2]. Sumber energy primer (prime mover) dapat berupa turbin hidrolik (PLTA), turbin uap (PLTU, PLTN, PLTG). Daya yang dibangkitkan akan disalurkan melalui saluran transmisi. Sebelum menuju ke saluran transmisi, tegangan *output* dari pembangkit akan dinaikkan menggunakan trafo step up untuk mengurangi rugi – rugi daya. Pada sistem transmisi terdapat interkoneksi antar *utility* sehingga memungkinkan adanya *dispatch* dan transfer daya antar region. Selanjutnya adalah distribusi, distribusi adalah proses penyaluran daya sesuai dengan permintaan beban.

2.2. Analisa Aliran Daya

Analisa aliran adaya merupakan bagian esensial untuk melakukan investigasi masalah masalah pada operasi maupun perencanaansistem tenaga. Analisa aliran daya berdasarkan kondisi spesifik nilai pembangkitan, struktur jaringan, dan kondisi beban. Berdasarkan kondisi tersebut, analisa *load flow* menyelesaikan analisa

pada kondisi *steady state* dengan nilai tegangan tiap node dan aliran daya pada saluran.

Metode perhitungan aliran daya berisi persamaan aljabar nonlinier tanpa adanya persamaan diferensial. Terdapat beberapa metode perhitunga aliran daya, antara lain

- a. Newton-Raphson
- b. Gauss-Seidel
- c. Fast Decoupled
- d. DC *Load flow*

2.3. Analisa Hubung Singkat

Berdasarkan ANSI/IEEE Std. 100-1992, gangguan didefinisikan sebagai suatu kondisi fisis yang disebabkan kegagalan suatu perangkat, komponen, atau suatu elemen untuk bekerja sesuai dengan fungsinya. Gangguan hampir selalu ditimbulkan oleh hubung singkat antar fasa atau hubung singkat satu fasa ke tanah. Suatu gangguan hampir selalu berupa hubung langsung atau melalui impedansi.

Hubung singkat merupakan hubungan antara dua titik dengan resistansi yang rendah yang disebabkan oleh kesalahan operasi maupun kegagalan insulasi. Karena nilai resistansi yang sangat rendah, arus yang mengalir pada titik tersebut memiliki arus yang sangat beasr. Arus yang sangat besar ini dapat menyebabkan kerusakan peralatan, *overheating*, arcing, ledakan dan sebagainya.

Studi hubung singkat diperlukan untuk melakukan analisis terhadap kemampuan peralatan (khususnya busbar dan *circuit breaker*) saat terjadi hubung singkat akibat gangguan kelistrikan.

Pada sebuah simulasi hubung singkat terdapat beberapa metode yang dapat digunakan antara lain:

- a. VDE 0102
- b. IEC 60909
- c. ANSI
- d. IEC 61363
- e. IEC 61660 (DC)
- f. ANSI/IEEE 946 (DC)

2.4. Analisa Kestabilan

Kestabilan sistem tenaga listrik adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik atau bagian komponennya untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem [3]. Masalah kestabilan sistem tenaga listrik menjadi salah satu perhatian utama selama operasi sistem tenaga, karena sangat terkait dengan keberlangsungan sistem secara parsial maupun keseluruhan sistem.

Kestabilan sistem dibagi menjadi tiga yaitu kestabilan *steady state*, kestabilan transien, dan kestabilan dinamik. Kestabilan *steady state* adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi antara mesin – mesin dalam sistem setelah mengalami gangguan kecil dan pada kondisi ambang batas kemampuan mesin. Kestabilan transien adalah kemampuan suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar yang bersidat mendadakn selama sekitar satu swing pertama dengan asumsi bahwa AVR dan Governor belum bekerja. Sedangkan kestabilan dinamik adalah kondisi ketabilan sistem setelah satu swing pertama dimana diasumsikan perangkat AVR, Governor, dan perangkat pelengkap lain sudah bekerja dan diperhitungkan. Pada fase ini perangkat AVR, Governor, dan perangkat lain memiliki pengaruh terhadap respon sistem setelah terjadi gangguan atau perubahan pada sistem.

2.4.1 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan sistem untuk menjaga tegangan saat *steady state* setelah terjadi gangguan. Kestabilan tegangan erat kaitannya dengan keseimbangan daya reaktif antara permintaan daya reaktif dan pembangkitan daya reaktif.

Ketidakstabilan tegangan dapat menyebabkan *voltage collapse* jika titik keseimbangan tegangan pada bus yang dekat dengan beban dibawah batas yang dapat diterima. *Voltage collapse* dapat juga disebut sebagai proses dimana terjadi ketidak stabilan tegangan pada bagian yang esensial pada sistem. *Voltage collapse* dapat menyebabkan blackout secara total maupun parsial.

Kestabilan tegangan dapat terjadi dalam jangka waktu yang panjang yakni pada domain waktu 10-20 detik. Fluktuasi tegangan dapat

terjadi akibat adanya perangkat yang memiliki respon cepat, seperti motor induksi, perangkat elektronika daya, HVDC dsb.

Salah satu langkah yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya *voltage collapse* adalah dengan menjaga tegangan pada range yang telah ditentukan. Sebagai contoh, bus pada transmisi 500 kV dijaga tegangannya pada range $\pm 5\%$. Hal ini bertujuan untuk menjaga tegangan tetap stabil ketika terjadi perubahan pada sistem dan perubahan beban. Sebagaimana disebutkan sebelumnya, dimana kestabilan tegangan erat kaitannya dengan keseimbangan daya reaktif, meskipun pada saluran transmisi terdapat rugi-rugi induktif, menjadi tidak efektif ketika dipasang kompensasi daya reaktif (contoh: kapasitor bank) pada saluran transmisi yang panjang. Namun lebih efektif ketika memasang kompensasi didekat beban dengan menyuplai daya reaktif secara local [4]

2.4.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi adalah kemampuan sistem untuk menjaga frekuensi tetap setelah terjadi gangguan antara pembangkitan dan beban [5]. Tingkat kestabilan frekuensi sistem tergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan dan beban dengan kehilangan beban seminimal mungkin. Ketidakstabilan frekuensi dapat menyebabkan terjadinya swing frekuensi sehingga dapat menyebabkan generator dan beban lepas dari sistem

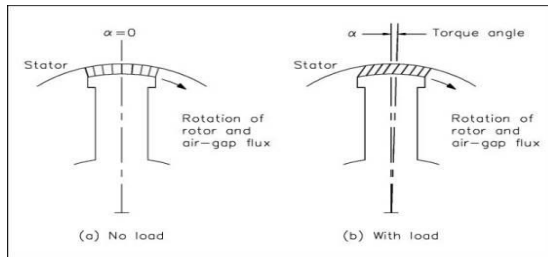
2.4.3 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan sistem untuk menjaga sinkronisasi mesin ketika terjadi gangguan [5] Sudut rotor generator tergantung pada keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik melalui *prime mover*. Pada saat generator belum dibebani, rotor akan berputar pada kecepatan sinkron. Jika generator dibebani, maka akan muncul torsi elektrik yang berlawanan dengan torsi mekanik (*prime mover*). Untuk menyeimbangkan torsi, perlu penambahan torsi mekanik, sehingga tercapai keseimbangan antara torsi mekanik dan torsi elektrik. Pada kondisi itu, generator akan kembali berputar pada putaran sinkron. Walaupun sudah pada kecepatan sinkron, posisi sumbu rotor generator telah tertinggal dan membentuk sudut δ yang biasa disebut sudut rotor.

Saat dalam masa transisi menuju kesetimbangan torsi, persamaan gerak pada kondisi ini dapat direpresentasikan dalam persamaan

$$J \cdot \delta = T_m - T_e \quad (2.1)$$

Dimana J adalah momen inersia dari sistem generator, sedangkan δ adalah sudut mekanik rotor, T_m adalah torsi mekanik, T_e adalah torsi elektrik.



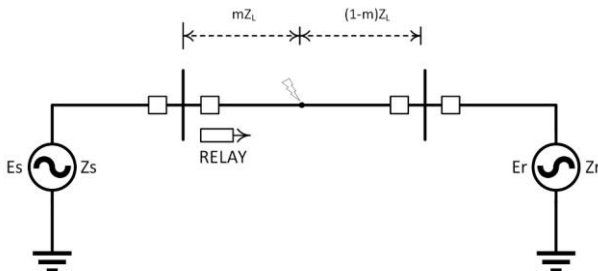
Gambar 2.2. Sudut rotor pada generator

Ketika sebuah generator yang sudah dalam kondisi seimbang terkena gangguan akibat adanya gangguan pada sistem atau perubahan pada sistem, ini dapat menyebabkan adanya osilasi sudut rotor. Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan menjadi *small disturbance angle stability* dan *large disturbance (transient) angle stability*. *Small disturbance angle stability* diakibatkan adanya perubahan kecil pada sistem, seperti beban kecil yang lepas, saluran lepas, generator kecil lepas, dsb. Sedangkan *large disturbance* atau *transient angle stability* dapat dipicu oleh peristiwa masuk atau lepasnya beban besar pada sistem, lepasnya generator besar, dsb. *Small disturbance* dan *large disturbance angle stability* di kategorikan sebagai fenomena singkat, karena berada dalam domain waktu 0.1 – 10 detik.

2.5 Relay Jarak

Pada kondisi normal, sistem tenaga beroperasi dengan daya dan tegangan yang ditentukan oleh pola operasi untuk memenuhi kebutuhan beban. Ketika terjadi gangguan, keseimbangan antara pembangkitan dan beban menjadi terganggu. Selama periode gangguan, energi yang awalnya menuju ke beban akan beralih ke jalur gangguan. Maka perlu adanya skema pengaman untuk mengisolasi gangguan [1].

Saat terjadi gangguan pada saluran transmisi, perlu ditentukan dimana lokasi gangguan agar dapat melakukan trip circuit breaker di tiap ujung saluran transmisi, sehingga dapat terisolasi dari sistem. Lokasi gangguan dapat ditentukan dari hasil pengukuran impedansi saluran antara titik pemasangan relay dengan lokasi gangguan. Biasanya pengukuran impedansi ini dilakukan oleh enam elemen pengukuran dimana tiga elemen pengukuran digunakan untuk mengukur gangguan fasa, dan tiga lainnya untuk gangguan ke tanah (*earth fault*). Keenam pengukuran ini mengacu pada pengukuran arus (I_R) dan tegangan V_R , sehingga impedansi yang terbaca oleh relay adalah $Z_R = V_R/I_R$. Impedansi yang terukur tergantung pada parameter – parameter sistem tenaga dan jenis gangguan, sehingga keenam relay ini tidak akan mengukur impedansi yang sama.



Gambar 2.3. Struktur penyusunan relay jarak pada sistem

Ketika sinyal I_R dan V_R tidak diatur secara tepat, akan menyebabkan kesalahan yang cukup besar dalam pengukuran impedansi saluran yang di lindungi. Input sinyal I_R dan V_R yang tepat dapat di representasikan menggunakan persamaan berikut.

Untuk gangguan tiga fasa dengan arus gangguan I_{F1} , tegangan relay adalah

$$V_R = \sqrt{3}I_{F1}mZ_L \quad (2.2)$$

$$Z_R = \sqrt{3}mZ_L \quad (2.3)$$

Untuk gangguan fasa ke fasa dengan arus gangguan I_{F2} , tegangan relay adalah

$$V_R = 2mZ_L \quad (2.4)$$

$$Z_R = 2mZ_L \quad (2.5)$$

Dalam menentukan wilayah proteksi saluran digunakan cara zonasi yang berdasarkan impedansi saluran yang akan dilindungi. Pembagian zonasi proteksi saluran memakai sistem 3 Zona atau 4 Zona. Namun penggunaan sistem zonasi yang umum digunakan adalah sistem 3 Zona, yaitu zona 1, zona 2, zona 3. Terdapat beberapa metode untuk menentukan settingan impedansi tiap zona, antara lain metode independen (*typical*), metode kumulatif, metode mengacu pada 1 saluran [6]

Metode Independen (*Typical*)

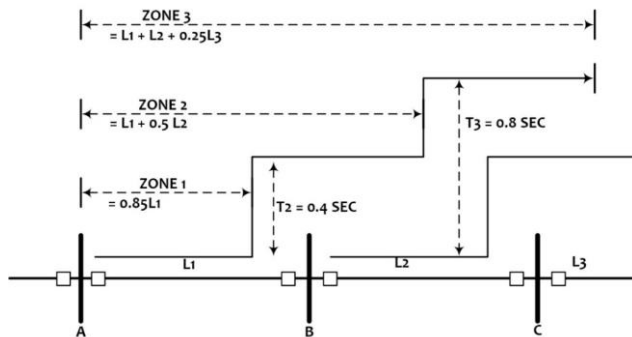
Zona pada metode independen dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$Z_{s1} = Z_{m1} \times Z_{f1} \quad (2.6)$$

$$Z_{s2} = Z_{m1} + Z_{m2} \times Z_{f2} \quad (2.7)$$

$$Z_{s3} = Z_{m1} + Z_{m2} + Z_{m3} \times Z_{f3} \quad (2.8)$$

Dimana Z_{sn} impedansi zona proteksi, Z_{mn} impedansi masing masing saluran, dan Z_f adalah *zone factor* (faktor pengali zonasi).



Gambar 2.4. Karakteristik *time-distance* untuk skema proteksi tiga zona

Pada pengaturan zona tipikal ini, zona proteksi dibagi menjadi 3. Zona 1 merupakan 80% - 85% dari saluran yang dilindungi. Ini berarti relay akan trip secara *instantaneous* apabila terjadi gangguan hubung singkat di 80 – 85 % dari saluran. Zona 2 merupakan zona proteksi diluar zona 1, yang mana biasanya mencakup zona 1 ditambah setengah dari saluran berikutnya. Zona 2 membutuhkan waktu trip dengan *time delay* sebesar 0.4 detik. Zona 3 merupakan zona proteksi yang meng-cover diluar zona 2 dimana area yang ter-cover adalah 25% dari feeder berikutnya. Zona 3 membutuhkan waktu trip dengan *time delay* 0.8 detik.

Metode Kumulatif

Zona pada metode kumulatif dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$Z_{s1} = Z_{m1} \times Z_{f1} \quad (2.9)$$

$$Z_{s2} = Z_{s1} + Z_{m2} \times (Z_f)^2 \quad (2.10)$$

$$Z_{s3} = Z_{s2} + Z_{m3} \times (Z_f)^3 \quad (2.11)$$

Dimana Z_{sn} impedansi zona proteksi, Z_{mn} impedansi masing masing saluran, dan Z_f adalah *zone factor* (faktor pengali zonasi).

Metode Mengacu pada Satu Line

Zona pada metode mengacu pada satu line dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$Z_{s1} = Z_{m1} \times Z_{f1} \quad (2.12)$$

$$Z_{s2} = Z_{m1} \times Z_{f2} \quad (2.13)$$

$$Z_{s3} = Z_{m1} \times Z_{f3} \quad (2.14)$$

Dimana Z_{sn} impedansi zona proteksi, Z_{mn} impedansi masing masing saluran, dan Z_f adalah *zone factor* (faktor pengali zonasi).

2.6 Power swing

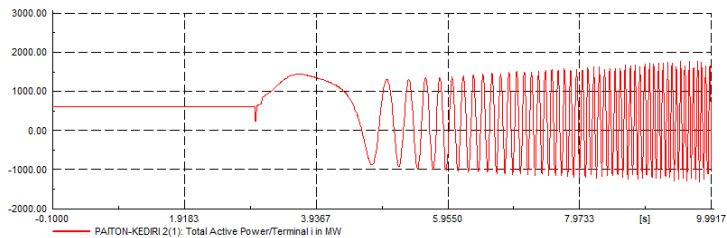
Power swing merujuk pada fenomena osilasi aliran daya aktif dan daya reaktif pada saluran transmisi yang diakibatkan oleh gangguan yang besar pada sistem. Gangguan pada sistem menyebabkan osilasi besar pada daya aktif dan daya reaktif, tegangan yang rendah,

ketidakstabilan tegangan, dan ketidakstabilan fase antara fase pada pembangkit dan konsumen.

Tabel 2.1. Penyebab dan dampak gangguan

Jenis gangguan	Pengaruh
Pelepasan beban	Hilangnya sinkronisasi antara tegangan
Pelepasan generator	Hilangnya sinkronisasi antara sudut fase
Penambahan beban	Hilangnya sinkronisasi antara urutan fase
Perubahan Saluran	Hilangnya sinkronisasi antara frekuensi

Dibawah ini adalah contoh plot grafik aliran daya aktif pada saluran ketika terjadi *power swing*.



Gambar 2.5. Osilasi daya aktif pada saluran transmisi

Power swing erat kaitannya dengan kestabilan generator. Jika daya mekanik yang diinputkan ke generator tetap, daya elektrik P_g yang dapat ditransfer dari generator ke beban dapat diketahui melalui persamaan berikut [7]

$$P_g = \frac{E_g E_l}{X} \sin \delta \quad (2.15)$$

Dimana:

E_g = Tegangan internal generator

E_l = Tegangan beban

X = Reaktansi antara generator dan beban

δ = Sudut tegangan antara tegangan internal dan tegangan beban

Salah satu dampak dari *power swing* adalah kesalahan trip pada relay jarak. Normalnya, relay jarak tidak akan trip baik dalam kondisi swing stabil maupun tidak stabil. Kesalahan trip ini sangat berbahaya bagi

sistem karena bisa terjadi efek domino pada sistem dan sangat memungkinkan untuk terjadi blackout.

Saat terjadi *power swing*, terjadi kebingungan pada komparator relay jarak [1]. Pada kondisi *steady state* relay jarak mendeteksi impedansi beban diluar area operasinya. Namun ketika terjadi *power swing*, impedansi beban dapat bergerak masuk ke area operasi relay jarak. Pada kondisi inilah relay jarak mendeteksi adanya gangguan dan mengirim sinyal trip ke CB [7].

2.7 FACTS Device

Peningkatan pembebanan pada saluran transmisi terkadang dapat menyebabkan jatuh tegangan karena kurangnya daya reaktif yang dikirim pada pusat beban. Hal ini disebabkan oleh peningkatan konsumsi daya reaktif dalam jaringan transmisi dan karakteristik beban (seperti motor induksi yang menyuplai torsi yang konstan). Injeksi daya reaktif buatan pada beban dapat meringankan jaringan transmisi dari aliran daya reaktif dan meningkatkan efisiensi transmisi dan faktor daya operasi, sedangkan injeksi buatan reaktansi negatif dalam saluran dapat meringankan saluran dari penurunan tegangan berlebih dan meningkatkan pengaturan tegangan [8].

Flexible Alternating Current Transmission System (FACTS) adalah sekelompok peralatan statis dan perangkat yang digunakan untuk transmisi AC dan distribusi energi listrik. Sebuah sistem berbasis elektronik arus kuat dan peralatan statis lainnya yang menyediakan kontrol dari satu atau lebih parameter sistem transmisi AC yang mengatur operasi sistem transmisi termasuk impedansi seri, impedansi paralel, arus, tegangan, sudut fasa, dan redaman osilasi pada berbagai frekuensi di bawah rating frekuensi. Kendala-kendala ini tidak dapat diatasi sementara keandalan sistem harus dipertahankan.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, dibutuhkan sesuatu untuk meningkatkan kualitas, kemampuan kontrol, fleksibilitas dan meningkatkan kemampuan transfer daya. Umumnya perangkat berbasis elektronik arus kuat digunakan. FACTS didefinisikan oleh IEEE sebagai "sebuah sistem berbasis elektronik arus kuat dan peralatan statis lainnya yang menyediakan kontrol dari satu atau lebih sistem transmisi AC dan

meningkatkan kapasitas transfer daya". Selain meningkatkan transfer daya, FACTS juga mampu mengurangi efek harmonisa dan meningkatkan kestabilan dinamik dan transien.

Berdasarkan perangkat elektronik arus kuat yang digunakan dalam kontrol, FACTS controller dapat diklasifikasikan sebagai:

(A) Tipe Variabel Impedansi: diklasifikasikan sebagai shunt dan series compensation (contoh : *Shunt Capacitor, Synchronous Condenser, SVC, Series Capacitor, TCSC*)

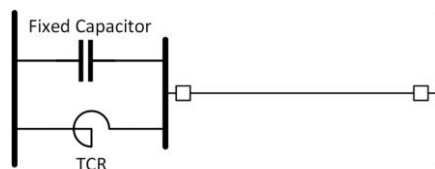
(B) *Voltage Source Converter* (VSC) (contoh : STATCOM, UPFC)

2.7.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

TCSC merupakan salah satu jenis FACTS *Device* yang bekerja sebagai sumber tegangan yang dapat dikontrol. TCSC umumnya digunakan pada saluran transmisi yang panjang untuk memperpendek saluran secara tidak langsung dengan cara mengurangi impedansi saluran.

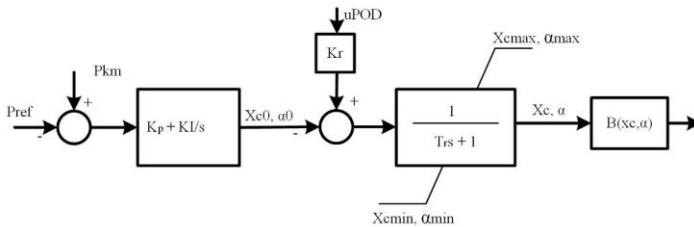
Beberapa fungsi TCSC antara lain:

- Mengurangi jatuh tegangan
- Mempengaruhi aliran daya pada saluran parallel
- Meningkatkan Kemampuan transfer saluran
- Mengurangi sudut transmisi
- Meningkatkan kestabilan sistem [9]
- Mengurangi arus hubung singkat



Gambar 2.6. Pemodelan TCSC pada sistem transmisi

TCSC merupakan salah satu jenis FACTS *device* yang berfungsi untuk mengkompensasi reaktansi saluran. Selain itu, TCSC juga dapat mengatur aliran daya secara cepat melalui mekanisme high speed switching menggunakan thyristor [10]. TCSC di representasikan dalam sebuah variable reactance (X_{TCSC}) yang dipasang secara seri terhadap saluran yang akan dikompensasi.

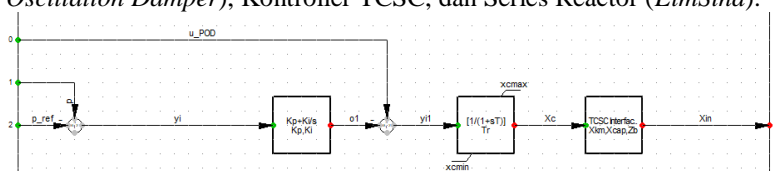


Gambar 2.7. Blok diagram kontroler TCSC

Berdasarkan referensi [11] kontroler TCSC dimodelkan melalui blok control yang terdiri dari kontroler PI dan first order lag derivative. Inti dari controller ini adalah controller blok proportional Integral (PI) dan blok first order delay. Tujuan dari control ini adalah untuk mengubah reaktansi dan menjaga aliran daya pada saluran.

Pada DIGSILENT Power Factory, untuk membuat sebuah controller dinamik, digunakan DSL (DIGSILENT Simulation Language). DSL memungkinkan pengguna untuk melakukan programming control pada beberapa elemen sistem tenaga, seperti elemen proteksi, reactor, generator, dsb. DSL menggunakan pemodelan berupa block diagram dan transformasi Laplace.

Satu buah konten DSL membutuhkan sebuah *interface*, yakni *composite* model yang mana *composite* model ini membutuhkan pendefinisian berupa *Composite Frame*. *Composite Frame* ini merupakan kerangka utama yang berfungsi untuk menghubungkan dan mengkomunikasikan beberapa komponen yang dibutuhkan oleh *composite model*. Pada controller TCSC ini, *composite frame* akan menghubungkan elemen pengukuran (*StaPqmea*), *u_POD* (*Power Oscillation Damper*), Kontroler TCSC, dan Series Reactor (*ElmSind*).



Gambar 2.8. Pemodelan blok diagram kontroler TCSC di *DIGSILENT PowerFactory*

Gambar diatas merupakan blok diagram kontroler TCSC pada DIGSILENT PowerFactory [12]. Pada blok tersebut, sinyal output yang terkontrol adalah sinyal Xin dan sinyal ini menjadi nilai input reaktansi

dari series reactor. Sinyal X_{in} ini dapat direpresentasikan dalam fungsi X_c yang dapat mengubah susceptansi dari TCSC ini.

$$b_{TCSC}(X_c) = - \frac{X_c / X_{km}}{X_{km} \cdot \left(1 - \frac{X_c}{X_{km}}\right)} \quad (2.16)$$

dimana,

$b_{TCSC}(X_c)$ = sinyal susceptansi TCSC
 X_c = sinyal control
 X_{km} = reaktansi saluran

Karena dalam pengimplementasian TCSC menggunakan sebuah fixed capacitor yang memiliki nilai reaktansi yang tetap, sinyal output dari persamaan 2.16 dapat diubah menjadi persamaan sinyal X_{in} . Setelah melalui beberapa penyederhanaan, didapatkan persamaan X_{in} sebagai berikut

$$X_{in} = - \frac{X_{cap}}{b_{TCSC} \cdot X_{cap} - 1} \quad (2.17)$$

dimana,

X_{in} = sinyal nilai reaktansi untuk variable reactor
 b_{TCSC} = susceptansi TCSC
 X_{cap} = reaktansi dari fixed capacitor

Karena rangkaian TCSC (gambar 2.6) merupakan sebuah rangkaian parallel antara kapasitor dan reactor, maka perlu adanya batasan operasi agar rangkaian tersebut tidak membentuk sebuah rangkaian resonansi paralel. Batasan operasi ini di definisikan pada blok first order time lag melalui limitasi x_{cmax} dan x_{cmin} . Nilai yang dibatasi ini adalah nilai output sinyal X_c . Dalam menentukan batasan operasi TCSC ini dapat menggunakan persamaan berikut

$$x_{cmin} = \frac{x_{km}}{1 + CF_{ind}} \quad (2.18)$$

$$x_{cmax} = \frac{x_{km}}{1 - CF_{cap}} \quad (2.19)$$

Karena output sinyal X_c dalam satuan p.u., sedangkan input reaktansi series reactor pada DIGSILENT adalah ohm, oleh karena itu sinyal X_c tersebut perlu dikonversi menjadi ohm melalui persamaan 2.20. Persamaan ini akan didefinisikan pada blok diagram TCSC *Interface*, yaitu blok terakhir pada gambar 2.8.

$$X_{in} = \left(\frac{(X_{cap} * X_{km}) - (X_{cap} * X_c)}{\left(\frac{X_{cap} * X_c}{X_{km}} \right) + X_{km} - X_c} \right) * Z_b \quad (2.20)$$

2.8 Standar yang Digunakan

Dalam melakukan studi ini, digunakan beberapa standar yang berhubungan dengan parameter operasi sistem tenaga listrik. Standar ini mengacu pada dokumen *Grid Code* sistem Jawa Bali. Parameter – parameter yang menjadi acuan antara lain standar operasi tegangan dan standar frekuensi tegangan. Berikut ini adalah standar – standar yang digunakan pada tugas akhir ini.

2.8.1 Standar Tegangan

Tegangan merupakan salah satu parameter penting yang harus dijaga nilainya. P2B sebagai pengatur sistem kelistrikan diharuskan menjaga nilai tegangan pada range tertentu selama operasi normal. Berikut merupakan standar tegangan operasi sistem Jawa Bali

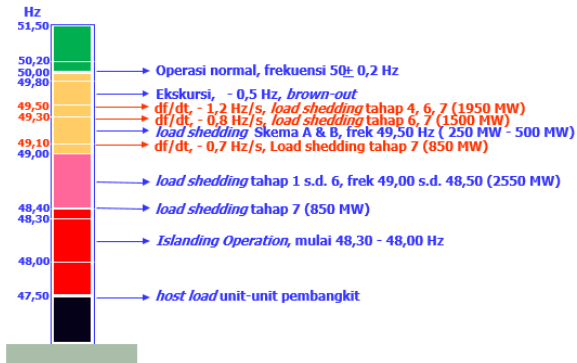
Tabel 2.2. Standar tegangan operasi sistem Jawa Bali

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

2.8.2 Standar Frekuensi

Frekuensi di sistem akan stabil apabila total pembangkitan sama dengan dengan total beban ditambah rugi-rugi jaringan. Apabila pembangkitan melebihi beban ditambah rugi-rugi, maka frekuensi Sistem naik. Begitupun sebaliknya.

Rentang pengaturan frekuensi yang sempit diperlukan untuk menyediakan frekuensi pasokan yang stabil bagi semua Pemakai Jaringan dan pelanggan akhir. 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 [13].



Gambar 2.9. Tongkat frekuensi sistem Jawa Bali

Sistem Jawa Bali memiliki standar frekuensi pada operasi normal berkisar antara 50 ± 0.2 Hz. Apabila frekuensi mencapai 49.8 maka akan dilakukan brownout, yakni menurunkan tegangan pada gardu induk. Hal ini bertujuan untuk menurunkan daya beban dengan cara menurunkan tegangan bus. Selanjutnya jika brown out belum berhasil menyelamatkan frekuensi sistem, akan dilakukan pelepasan beban (*load shedding*) menggunakan relay df/dt pada range frekuensi 49.5-49.1. Tahap selanjutnya jika sistem tetap tidak mencapai frekuensi standar akan dilakukan pelepasan beban menggunakan UFLS (*Under Frequency Load Shedding*) 7 tahap, mulai dari frekuensi 49-48.4. Apabila frekuensi mencapai 48.3 Hz, akan dilakukan skema *Islanding Operation*, dimana sistem Jawa Bali akan dipecah menjadi beberapa wilayah kecil berdasarkan subsistem-nya. Pada tahap ini sistem Jawa Bali seolah-olah membentuk pulau – pulau kecil yang terdiri dari pembangkit dan beban.

Pengendalian frekuensi dicapai melalui aksi governor unit pembangkit, unit pembangkit yang memiliki *automatic generation control* , perintah Pusat Pengatur Beban ke Pembangkit untuk menaikkan atau menurunkan titik setting governor dalam mengantisipasi perubahan beban, penurunan tegangan dalam rangka menurunkan beban Sistem, pengurangan beban secara manual, peralatan pelepasan beban otomatis dengan relai frekuensi rendah, dan pelepasan generator oleh relai frekuensi lebih [13].

Dalam rangka menyediakan indikasi waktu yang andal bagi peralatan pelanggan yang menghitung jam berdasarkan frekuensi, Pusat Pengatur Beban harus berusaha untuk menghindari kesalahan waktu (time error) lebih dari 30 detik.

BAB III

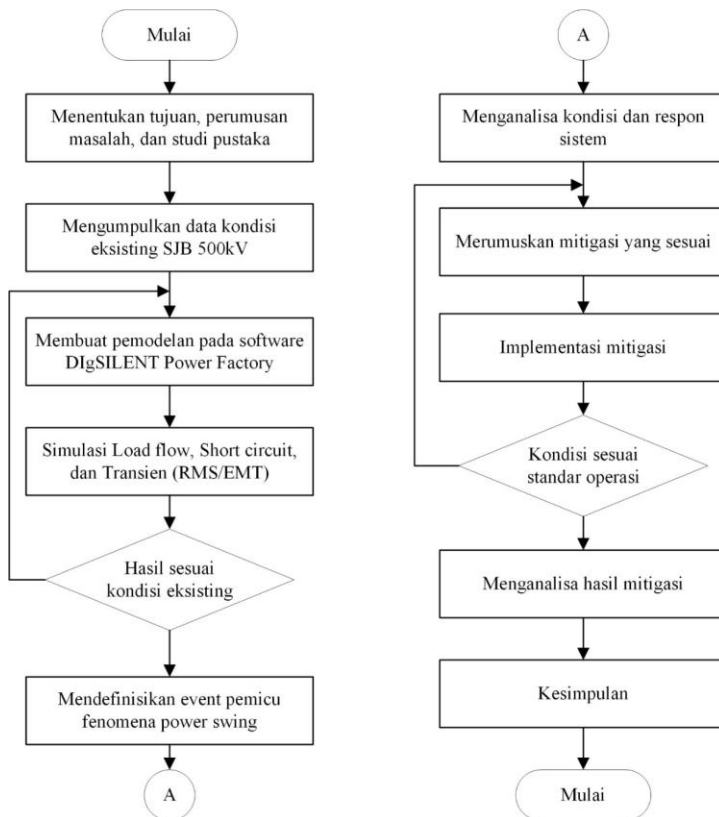
METODOLOGI PENELITIAN DAN PEMODELAN SISTEM

Pada tugas akhir ini akan dilakukan mitigasi untuk mengatasi fenomena *power swing* pada sistem Jawa Bali 500 kV. *Power swing* dapat terjadi akibat imbas dari gangguan besar pada sistem, yang mana akan terjadi osilasi P dan Q pada saluran transmisi. Fenomena ini harus dihindari selama sistem beroperasi, karena dapat menyebabkan beberapa dampak negative, salah satunya yaitu menyebabkan kesalahan trip pada relay jarak. Bahkan dapat menyebabkan sistem blackout secara keseluruhan. Oleh karena itu, perlu adanya mitigasi apabila terjadi fenomena power wing, khususnya pada sistem Jawa Bali 500 kV. Pada tugas akhir ini, mitigasi yang dilakukan adalah dengan penambahan TCSC pada saluran. TCSC memiliki karakteristik yang dapat mengatur reaktansi saluran, sehingga diharapkan dapat meningkatkan kemampuan transfer daya. Selain itu, TCSC juga dapat melakukan redaman osilasi daya aktif pada saluran. Mitigasi dan simulasi sistem menggunakan *software* DlgSILENT Power Factory 15.1. Pada bab ini akan dibahas mengenai metodologi penelitian dan pemodelan sistem. Dimana pemodelan sistem ini akan mencakup pemodelan saluran, pembangkit, beban, dan setting pengaman pada relay jarak.

3.1 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian merupakan langkah-langkah terstruktur dan sistematis yang akan dilakukan pada penelitian dari awal hingga akhir.

Berikut merupakan diagram alir metodologi penelitian pada tugas akhir ini.



Gambar 3.1. Diagram alir metodologi penelitian

Berikut ini adalah penjelasan untuk tiap langkah yang tercantum dalam flowchart di atas

Langkah 1 : Penelitian ini diawali dengan menentukan tujuan, rumusan masalah, dan melakukan kajian pustaka terkait topik ini.

Langkah 2 : Melakukan pengumpulan data berupa data saluran, beban, pembangkitan, rekapitulasi arus short circuit, dan data dinamik generator. Data tersebut didapat dari PT

- PLN (Persero) P2B dengan mengacu pada kondisi eksisting tahun 2018
- Langkah 3 : Membuat pemodelan sistem berdasarkan data hasil dari langkah 2. Subsistem (150kV) dimodelkan menggunakan generator tambahan yang tidak menyuplai P dan Q. Sehingga diharapkan dapat menghasilkan permodelan yang sesuai dengan kondisi real
- Langkah 4 : Melakukan simulasi menggunakan *software* DIGSILENT Power Factory. Simulasi yang dilakukan antara lain *load flow*, short circuit, dan transien (RMS / EMT)
- Langkah 5 : Dari hasil simulasi akan divalidasi, apakah sudah sesuai dengan kondisi. Apabila sudah sesuai dengan kondisi, data hasil simulasi ini akan digunakan pada langkah langkah selanjutnya
- Langkah 6 : Melakukan pendefinisian dan memodelkan jenis event yang dapat memicu munculnya fenomena *power swing*. Event tersebut dapat berupa gangguan short circuit, generator lepas, generator masuk, dsb.
- Langkah 7 : Setelah didapatkan adanya fenomena *power swing*, akan dilakukan analisa kondisi dan respon sistem saat terjadi *power swing*. Beberapa parameter yang dilihat antara lain frekuensi, sudut rotor, tegangan, dan respon relay jarak. Pada tugas akhir ini, yang menjadi perhatian adalah respon relay jarak, apakah terjadi mal-trip, sebagaimana pada [1]
- Langkah 8 : Melakukan perumusan mitigasi yang sesuai sehingga dapat mengatasi akibat dari *power swing*.
- Langkah 9 : Melakukan implementasi mitigasi pada sistem. Simulasi dari pengimplementasian mitigasi ini menggunakan modul transien (RMS/EMT) pada *software* DIGSILENT Power Factory
- Langkah 10 : Mereview dan menganalisa respon sistem setelah dilakukan implementasi mitigasi. Pada tahap ini

dilakukan pengecekan kondisi sistem apakah sudah memenuhi standar operasi.

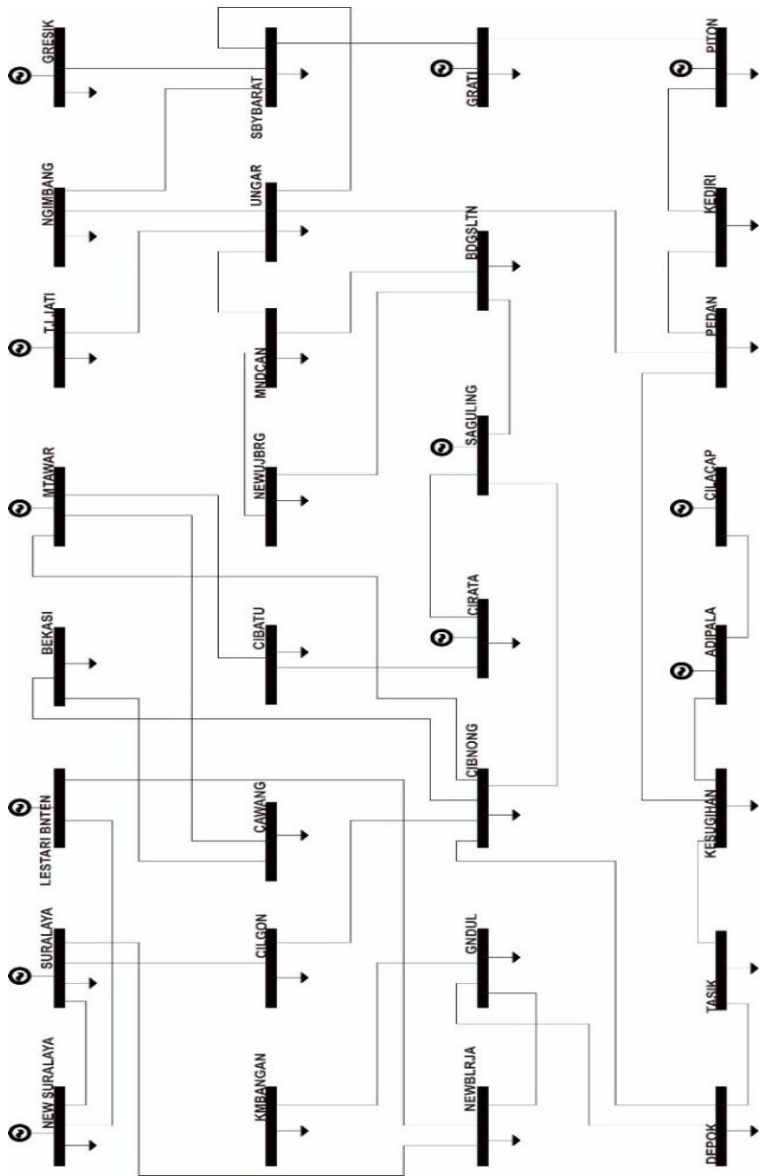
Langkah 11 : Menganalisa dan merekapitulasi hasil tiap jenis mitigasi. Parameter yang dianalisa antara lain frekuensi sistem SJB, sudut rotor, dan tegangan bus.

Langkah 12 : Dari analisa yang telah dilakukan pada langkah 10, akan ditarik kesimpulan jenis mitigasi apa yang tepat untuk diimplementasikan sehingga sistem tetap stabil dan beroperasi sesuai dengan standar.

3.2 Pemodelan Sistem Kelistrikan Jawa Bali 500 kV

Sistem Jawa Bali secara keseluruhan ditopang oleh sistem transmisi 500 kV yang terinterkoneksi satu sama lain. Pada tugas akhir ini., data untuk pemodelan sistem menggunakan data dari PT PLN (Persero) P2B, yaitu data topologi jaringan dan data hasil pembacaan SCADA (pembebanan IBT, tegangan bus, pembangkitan, on/off reaktor). Data ini merujuk data per 17 Juli 2018 pada beban puncak siang.

Gambar berikut merupakan *single line diagram* sistem Jawa Bali 500 kV. Sistem Jawa Bali 500 kV memiliki 31 GITET (Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi), dan 12 *plant* pembangkit berupa PLTU, PLTG, PLTGU, dan PLTA. *Plant* New Suralaya memiliki 1 buah generator, Suralaya memiliki 7 generator, Lestari Banten (LBE) memiliki 1 generator, Muaratawar memiliki 15 generator, Cirata memiliki 8 generator, Saguling memiliki 4 generator, Adipala memiliki 1 generator (belum beroperasi), Cilacap memiliki 1 generator, Tanjung Jati memiliki 4 generator, Gresik memiliki 11 generator, Grati memiliki 4 generator, dan Paiton memiliki 8 generator.



Gambar 3.2. Single line diagram sistem Jawa Bali 500kV

Dalam simulasi ini, generator yang dijadikan slack (reference machine) adalah PLTA Saguling Unit 2. Sedangkan MVA_{BASE} yang digunakan adalah 1 MVA untuk nilai per-unit yang kurang dari 1 pu, dan 100 MVA untuk nilai per-unit yang lebih dari 1 pu.

Berikut ini adalah data bus dan pembebanan masing-masing IBT pada tiap bus.

Tabel 3.1. Beban dan pembangkitan tiap bus

Bus	Beban IBT		Pembangkitan	
	P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]
ADIPALA	0	0	0	0
BDSL N	619	292	0	0
BEKASI	343	114	0	0
	279	153	0	0
CIBATU	376	161	0	0
	630	386	0	0
CIBNG	331	-49	0	0
	269	244	0	0
CILACAP	0	0	566	109
CILEGON	457	249	0	0
	174	-33	0	0
CIRATA	467	144	85	69
CWANG	557	73	0	0
	104	77	0	0
DEPOK	505	12	0	0
GNDUL	248	21	0	0
	174	78	0	0
GRATI	563	258	266	46.55512
GRESIK	150	357	491	462.4749
KEDIRI	173	66	0	0
	281	186	0	0
KESUGIHAN	0	0	0	0
KMBGN	155	-58	0	0
LESTARI BANTEN	0	0	634	20
MDCAN	96	49	0	0
MUARA TAWAR	0	0	1214	524.0899

Tabel 3.2. Beban dan pembangkitan tiap bus (lanjutan)

Bus	Beban IBT		Pembangkitan	
	P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]
NBANG	78	34	0	0
	74	28	0	0
NEW BLRJA	644	86	0	0
	570	54	0	0
NEW SRLYA	0	0	568	253.2962
NEW UJBRG	0	0	0	0
PAITON	396	40	3306	854.6246
	246	25	0	0
PEDAN	651	219	0	0
SBYBARAT	467	132	0	0
	653	247	0	0
SGLNG	0	0	15.90659	63.16519
SRLYA	116	53	2797	947.644
TASIK	61	36	0	0
	62	31	0	0
TJ JATI	248	90	2133	675.8439
UNGAR	573	266	0	0
	120	250	0	0

Dari data tersebut, GI yang memiliki tingkat pembebanan yang cukup tinggi yaitu GI Surabaya Barat, GI Bekasi, GI Ungaran. Pada beberapa IBT, terdapat nilai daya reaktif yang bernilai minus (-). Hal ini disebabkan karena adanya suntikan daya reaktif dari sistem 150 kV, baik dari pembangkit di 150 kV maupun dari saluran transmisi 150 kV akibat adanya fenomena *line charging*.

Dari sisi saluran, sistem Jawa Bali menggunakan konduktor tipe ACSR yang memiliki jenis dan rating yang berbeda, diantaranya yaitu berjenis ZEBRA, GANNET, HAWK, dan DOVE. Sistem Jawa Bali 500 kV memiliki saluran sebanyak 62 , dan sebagian besar menggunakan saluran sirkuit ganda (*double circuit*). Berikut merupakan data saluran transmisi Jawa Bali 500 kV tahun 2018.

Tabel 3.2. Karakteristik saluran transmisi Jawa Bali 500 kV

Nama Saluran	Jenis Konduktor	Pnjng [km]	Z1 [ohm]	R1 [ohm]	X1 [ohm]
ADIPALA-CILACAP 1	ZEBRA 4X484.5mm (3240A)	4.798	1.103	0.095	1.099
ADIPALA-CILACAP 2	ZEBRA 4X484.5mm (3240A)	4.798	1.103	0.095	1.099
BDSL N-NEW UJBRG	GANNET 4X392.8mm (2400A)	36.2	10.205	0.909	10.165
BEKASI-CIBNG	DOVE 4X327.9mm (1980A)	37.9	10.726	1.11	10.669
CBNG-DEPOK 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	14	3.962	0.41	3.941
CBNG-DEPOK 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	14	3.962	0.41	3.941
CILEGON - CIBINONG	GANNET 4X392.8mm (2400A)	130.8	36.875	3.283	36.729
CIRATA-CIBATU 1	ZEBRA 4X484.5mm (3240A)	46	10.574	0.915	10.534
CIRATA-CIBATU 2	ZEBRA 4X428.9mm	46	12.334	0.913	12.3
CIRATA-SGLNG 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	25.2	7.132	0.738	7.094
CIRATA-SGLNG 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	25.2	7.132	0.738	7.094
CWANG-BEKASI	DOVE 4X327.9mm (1980A)	16.8	4.755	0.492	4.729
DEPOK-TASIK 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	275.6	78.001	8.075	77.581
DEPOK-TASIK 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	275.6	78.001	8.075	77.581
GNDUL-DEPOK 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	7.5	2.123	0.22	2.111
GNDUL-DEPOK 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	7.5	2.123	0.22	2.111
GRATI-SBY BARAT 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	92.4	26.049	2.319	25.946
GRATI-SBY BARAT 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	92.4	26.049	2.319	25.946
KESUGIHAN-ADPALA 1	ZEBRA 4X484.5mm (3240A)	13.7	3.149	0.273	3.137
KESUGIHAN-ADPALA 2	ZEBRA 4X484.5mm (3240A)	13.7	3.149	0.273	3.137
KESUGIHAN-PEDAN 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	195.0 9	54.999	4.897	54.78
KESUGIHAN-PEDAN 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	195.0 9	54.999	4.897	54.78

Tabel 3.2 Karakteristik saluran transmisi Jawa Bali 500 kV (lanjutan 1)

Nama Saluran	Jenis Konduktor	Pnjng [km]	Z1 [ohm]	R1 [ohm]	X1 [ohm]
KMBGN-GNDUL 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	30.1	8.486	0.756	8.452
KMBGN-GNDUL 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	30.1	8.486	0.756	8.452
LESTARI BANTEN- NEW BLRJA 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	49.6	13.983	1.245	13.92 8
LESTARI BANTEN- NEW BLRJA 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	49.6	13.983	1.245	13.92 8
MDCAN-BDSL N	DOVE+GANNET 4X327.9mm	154.2	43.591	4.318	43.37 6
MDCAN-NEW UJBRG	DOVE+GANNET 4X327.9mm	121.59	34.372	3.405	34.20 3
MUARA TAWAR- CIBATU 1	DOVE 4X282mm 2292A	48.2	18.814	13.35 1	13.25 5
MUARA TAWAR- CIBATU 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	48.2	13.642	1.412	13.56 8
MUARA TAWAR- CIBNG	DOVE 4X327.9mm (1980A)	50.5	14.293	1.48	14.21 6
MUARA TAWAR- CWANG	DOVE 4X327.9mm (1980A)	40.9	11.576	1.198	11.51 3
NEW BLRJA-GNDUL 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	46.2	13.076	1.354	13.00 5
NEW BLRJA-GNDUL 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	46.2	13.076	1.354	13.00 5
NEW SRLYA-LESTARI BANTEN 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	1.781	0.504	0.052	0.501
NEW SRLYA-LESTARI BANTEN 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	1.781	0.504	0.052	0.501
NEW SRLYA-SRLYA	GANNET 4X392.8mm (2400A)	1.5	0.423	0.038	0.421
PAITON-GRATI 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	87.9	24.781	2.206	24.68 2
PAITON-GRATI 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	87.9	24.781	2.206	24.68 2
PAITON-KEDIRI 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	209.1	58.949	5.248	58.71 5
PAITON-KEDIRI 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	209.1	58.949	5.248	58.71 5
PEDAN-KEDIRI 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	202.4	57.061	5.08	56.83 4
PEDAN-KEDIRI 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	202.4	57.061	5.08	56.83 4
SBY BARAT-GRESIK 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	23.94	6.776	0.701	6.739

Tabel 3.2 Karakteristik saluran transmisi Jawa Bali 500 kV (lanjutan 2)

Nama Saluran	Jenis Konduktor	Pnjng [km]	Z1 [ohm]	R1 [ohm]	X1 [ohm]
SBY BARAT- GRESIK 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	23.94	6.776	0.701	6.739
SBYBARAT- NBANG	DOVE 4X327.9mm (1980A)	47.6	13.472	1.395	13.399
SBYBARAT- UNGAR	DOVE 4X327.9mm (1980A)	267.11	75.598	7.826	75.191
SGLNG-BDSL N 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	37.6	10.6	0.944	10.558
SGLNG-BDSL N 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	37.6	10.6	0.944	10.558
SGLNG-CBNG 1	GANNET 4x337.8mm 2551A	80.4	22.114	1.93	22.03
SGLNG-CBNG 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	80.4	22.666	2.018	22.576
SRLYA-CILEGON 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	12.9	3.637	0.324	3.622
SRLYA-CILEGON 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	12.9	3.637	0.324	3.622
SRLYA-NEW BLRJA 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	64.3	18.198	1.884	18.1
SRLYA-NEW BLRJA 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	64.3	18.198	1.884	18.1
TASIK- KESUGIHAN 1	GANNET 4X392.8mm (2400A)	53.045	14.954	1.331	14.895
TASIK- KESUGIHAN 2	GANNET 4X392.8mm (2400A)	53.045	14.954	1.331	14.895
TJ JATI-UNGAR 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	134.8	38.151	3.95	37.946
TJ JATI-UNGAR 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	134.8	38.151	3.95	37.946
UNGAR-MDCAN 1	DOVE 4X327.9mm (1980A)	222.9	63.085	6.531	62.746
UNGAR-MDCAN 2	DOVE 4X327.9mm (1980A)	222.9	63.085	6.531	62.746
UNGAR-NBANG	DOVE 4X327.9mm (1980A)	207.7	58.783	6.086	58.468
UNGAR-PEDAN	GANNET 4X392.8mm (2400A)	75.3	21.229	1.89	21.144

3.3 Pemodelan *Setting Relay Jarak*

Salah satu dampak dari *power swing* adalah kesalahan trip pada relay jarak. Pada kondisi *power swing*, relay jarak bisa saja mendeteksi *power swing* tersebut sebagai gangguan hubung singkat. Oleh karena itu perlu adanya pemodelan setting relay jarak pada saluran transmisi.

Terdapat beberapa metode perhitungan untuk menentukan setting zona pada relay jarak, antara lain menggunakan metode independen (persamaan 2.6 , 2.7 , 2.8) metode kumulatif (persamaan 2.9 , 2.10 , 2.11), metode mengacu pada satu line (persamaan 2.12, 2.13, 2.14). Pada tugas akhir ini digunakan metode independen sebagaimana mengacu pada [1]. Persamaan setting zona pada metode ini adalah sebagai berikut:

$$Z1 = 0.85L1 \quad (3.1)$$

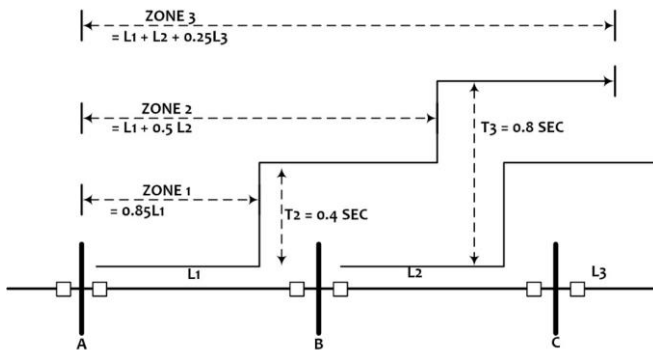
$$Z2 = L1 + 0.5L2 \quad (3.2)$$

$$Z3 = L1 + L2 + 0.25 L3 \quad (3.3)$$

dimana

Z_n : Impedansi tiap zona

L_n : Impedansi saluran ke-n



Gambar 3.3. Karakteristik *time-distance* untuk skema proteksi tiga zona

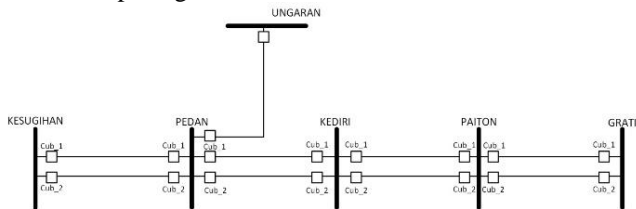
Pada tugas akhir ini pemodelan relay jarak menggunakan Relay Jarak General Electric (GE Distance) dengan karakteristik Mho. CT (current transformer) yang digunakan adalah 1600/5A dan VT yang digunakan adalah 500/0.11 kV.

Berdasarkan persamaan 3.1, 3.2, 3.4 dihasilkan perhitungan setting relay jarak sebagai berikut.

Tabel 3.3. Setting relay jarak tiap cubicle

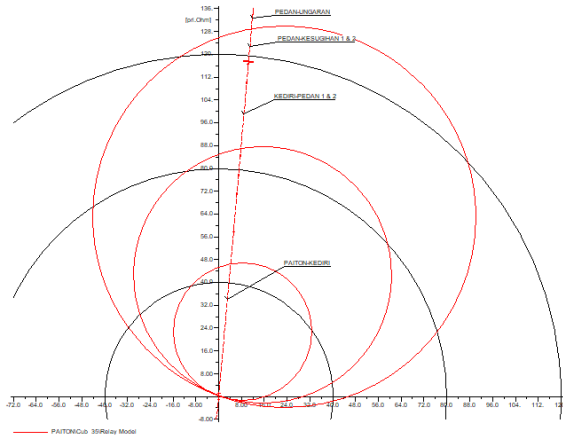
No	Nama Bus	Cubicle	Element	Zone 1	Zone 2	Zone 3
1	PAITON	Cub_1	Paiton-Kediri 1	48.799	90.52	134.27
		Cub_2	Paiton-Kediri 2	48.799	90.52	134.27
		Cub_3	Paiton-Grati 1	20.514	39.119	52.597
		Cub_4	Paiton-Grati 2	20.514	39.119	52.597
2	KEDIRI	Cub_1	Paiton-Kediri 1	48.799	73.819	93.379
		Cub_2	Paiton-Kediri 2	48.799	73.819	93.379
		Cub_3	Kediri-Pedan 1	47.235	87.499	116.77
		Cub_4	Kediri-Pedan 2	47.235	87.499	116.77
3	PEDAN	Cub_1	Kediri-Pedan 1	47.235	89.543	126.45
		Cub_2	Kediri-Pedan 2	47.235	89.543	126.45
		Cub_3	Pedan-Kesugihan 1	45.528	58.539	60.454
		Cub_4	Pedan-Kesugihan 2	45.528	58.539	60.454
4	KESUGIHAN	Cub_1	Pedan-Kesugihan 1	45.528	86.432	131.2
		Cub_2	Pedan-Kesugihan 2	45.528	86.432	131.2
5	GRATI	Cub_1	Paiton-Grati 1	20.514	56.141	101.4
		Cub_2	Paiton-Grati 2	20.514	56.141	101.4
		Cub_3	Grati-Sby Barat 1	21.564	26.955	26.955
		Cub_4	Grati-Sby Barat 2	21.564	26.955	26.955

Sedangkan, topologi jaringan dari data diatas dapat direpresentasikan pada gambar berikut.

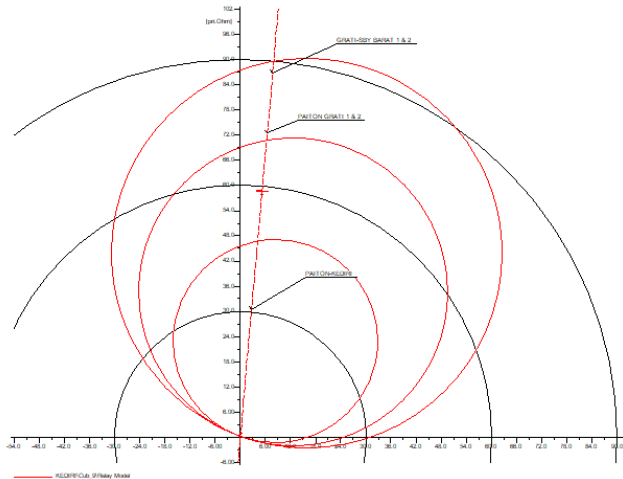


Gambar 3.4. Topologi jaringan yang dilakukan pemodelan setting relay jarak

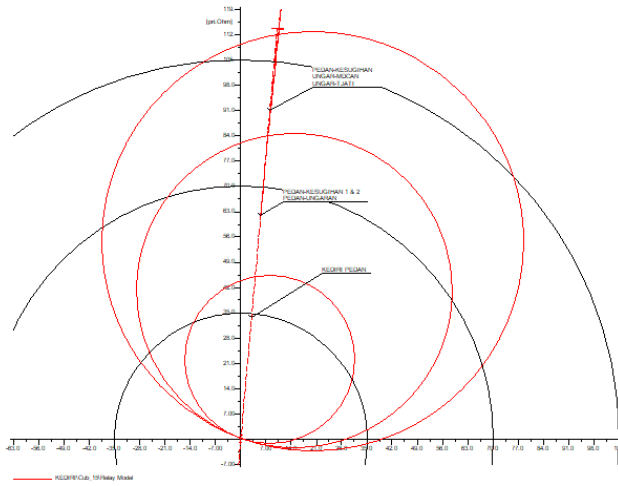
Permodelan setting relay jarak dilakukan pada cubicle saluran – saluran yang berdekatan, yakni saluran dari Grati hingga Kesugihan yang meliputi saluran Grati- Paiton, Paiton – Kediri, Kediri – Pedan, Pedan – Kesugihan, dan Pedan Ungaran. Relay – relay tersebut merupakan relay yang kemungkinan besar mengalami dampak dari *power swing*.



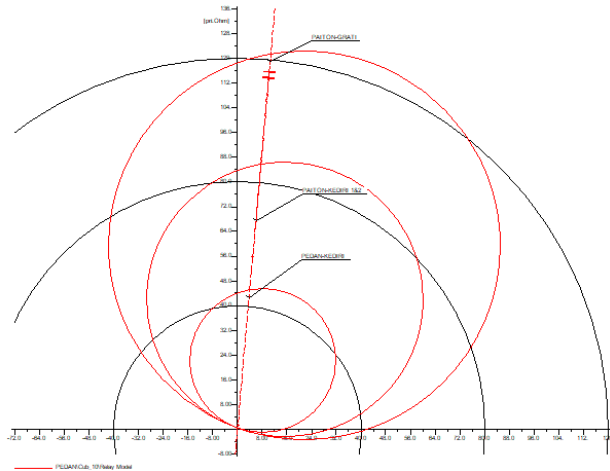
Gambar 3.5. Karakteristik mho relay jarak Paiton - Kediri 1 & 2



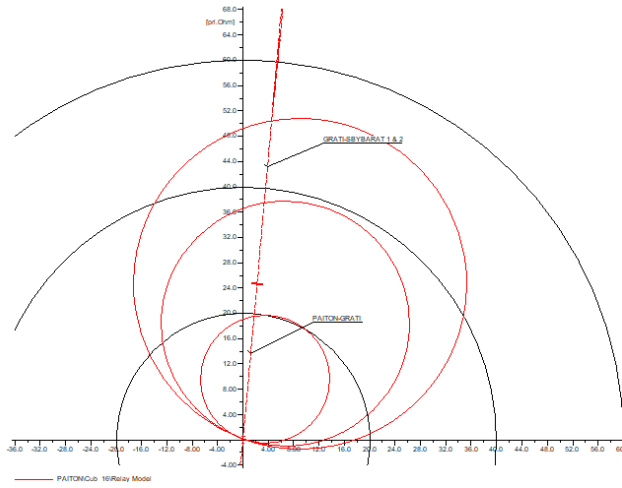
Gambar 3.6. Karakteristik mho relay jarak Kediri - Paiton 1 & 2



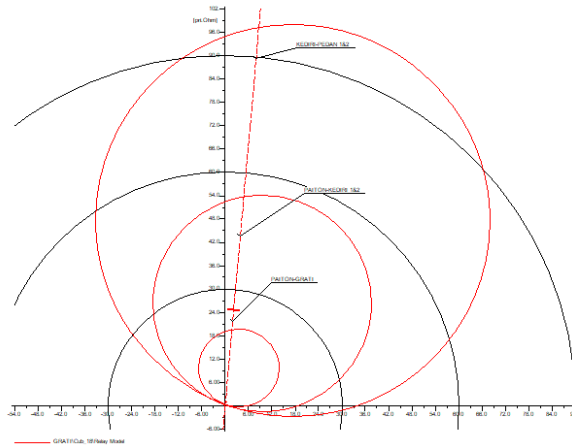
Gambar 3.7. Karakteristik mho relay jarak Kediri - Pedan 1 & 2



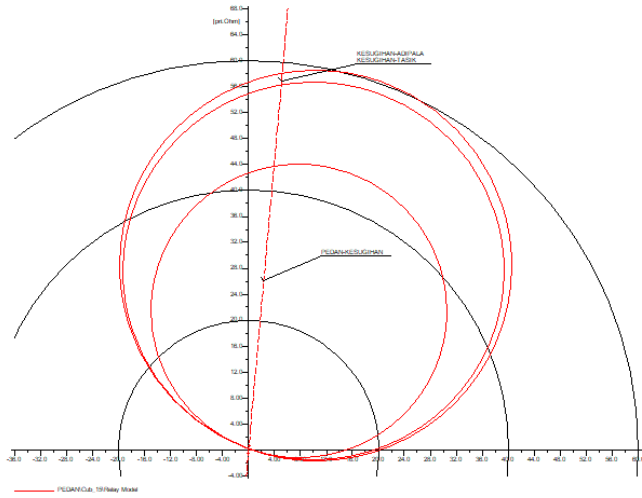
Gambar 3.8. Karakteristik mho relay jarak Pedan - Kediri 1 & 2



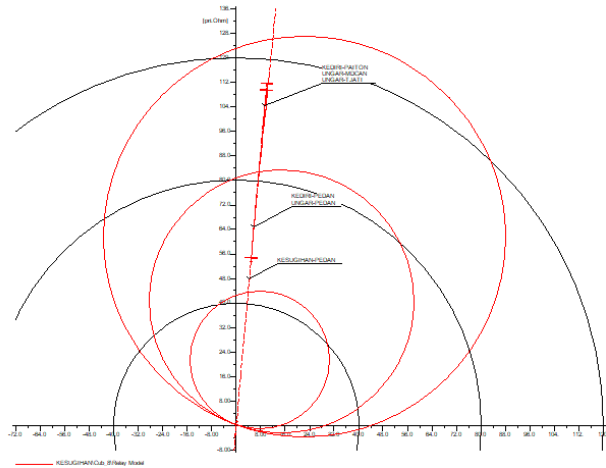
Gambar 3.9. Karakteristik mho relay jarak Paiton - Grati 1 & 2



Gambar 3.10. Karakteristik mho relay jarak Grati - Paiton 1 & 2



Gambar 3.11. Karakteristik mho relay jarak Pedan - Kesugihan 1 & 2

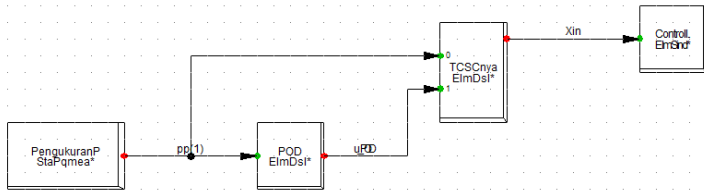


Gambar 3.12. Karakteristik mho relay jarak Kesugihan - Pedan 1 & 2

3.4 Pemodelan TCSC

Implementasi TCSC pada DIGSILENT Power Factory menggunakan satu buah fixed capacitor yang di paralelkan dengan variable reactance reactor (TCR). TCR ini dimodelkan menggunakan komponen series reactor (*ElmSind*) yang dikontrol oleh sebuah *composite* model (*ElmComp*).

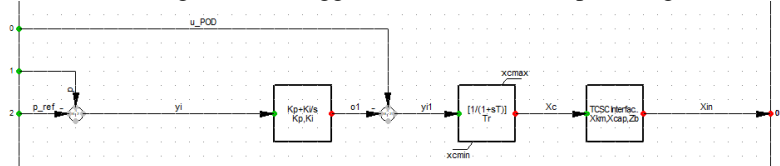
Langkah pertama dalam pemodelan TCSC pada DIGSILENT adalah membuat *Composite* Frame. Sebagaimana disebutkan sebelumnya, *composite* frame berfungsi untuk menghubungkan antar elemen sehingga memungkinkan terjadinya komunikasi antar elemen [14]. Setiap blok pada *composite* frame membutuhkan pendefinisian jenis elemen yang akan mengisi blok frame tersebut (contoh : *ElmDsl*, *ElmSind*, *StaPqmea*).



Gambar 3.13. *Composite* Frame TCSC menggunakan DSL

Blok frame PengukuranP (*StaPqmea*) diisi oleh elemen pengukuran daya P dan Q yang didefinisikan oleh elemen *StaPqmea*. Output dari blok ini akan dijadikan inputan pada blok POD dan blok TCSCnya. Output dari POD juga menjadi inputan dari controller TCSC. Hasil akhir dari blok kontrol ini adalah sinyal *Xin* yang mana sinyal ini menjadi sinyal inputan nilai reaktansi dari series reactor (*ElmSind*).

Langkah selanjutnya adalah pembuatan blok diagram *controller* TCSC. Blok diagram ini menggunakan fasilitas DSL pada DIGSILENT.



Gambar 3.14. Blok controller TCSC menggunakan DSL

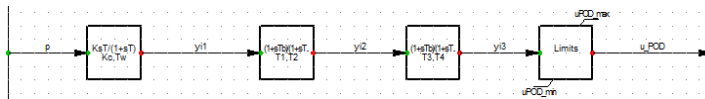
Setiap blok DSL pada DiGSILENT memerlukan pendefinisian initial condition dan pendefinisian tiap parameter input. Pada blok diagram diatas initial condition termuat dalam variable x1 dan x2. Pendefinisian variable tersebut secara lengkap tercantum pada persamaan berikut.

```
inc(x1) = ( - ( (Xin*Xkm) / Zb ) + (Xcap*Xkm) ) / (Xcap + ( (Xin*Xcap) / (Zb*Xkm) ) -
(Xin/Zb))
inc(x2) = -x1
inc(p_ref) = p
inc(u_POD) = 0

vardef(Xkm) = 'pu'; 'Line reactance'
vardef(Xcap) = 'pu'; 'Reactance of the fixed capacitor'
vardef(Zb) = 'ohm'; 'Base Impedance'
vardef(Kp) = 'pu'; 'PI controller proportional gain'
vardef(Ki) = 'pu'; 'PI controller integral gain'
vardef(Tr) = 's'; 'First order delay time constant'
vardef(xcmin) = 'pu'; 'Minimum limit of the first order delay'
vardef(xcmax) = 'pu'; 'Maximum limit of the first order delay'
```

Gambar 3.15. Script initial condition dan variable definition controller TCSC

Langkah ketiga yakni pembuatan model POD (Power Oscillation Damper). POD ini berfungsi untuk meningkatkan redaman ketika terjadi osilasi selama periode respon dinamik [15]. Pada dasarnya POD ini berisi controller linier yang terdiri dari washout filter, dinamik lead lag compensator, dan limiter statis. Washout filter pada POD bekerja sebagai highpass filter yang mana filter ini akan memicu controller untuk bekerja hanya pada saat terjadi gangguan transien.



Gambar 3.16. Blok controller uPOD menggunakan DSL

Sama seperti blok TCSC, blok ini juga memerlukan pendefinisian initial condition dan pendefinisian parameter input. Pendefinisian tersebut tercantum pada persamaan berikut

```
inc(x1)=p
inc(x2)=0
inc(x3)=0
inc(u_POD)=0

vardef(Kc)='pu';'Stabilizer gain'
vardef(Tw)='s';'Washout time constant'
vardef(T1)='s';'Phase compensation time constant 1'
vardef(T2)='s';'Phase compensation time constant 2'
vardef(T3)='s';'Phase compensation time constant 3'
vardef(T4)='s';'Phase compensation time constant 4'
vardef(uPOD_min)='pu';'Output minimum limit'
vardef(uPOD_max)='pu';'Output maximum limit'
```

Gambar 3.17. *Script initial condition dan variable definition* kontroler uPOD

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan dibahas mengenai hasil dan analisa mitigasi fenomena *power swing* di sistem Jawa Bali 500 kV yang disimulasikan menggunakan *software* DIGSILENT PowerFactory 15.1. Analisa fenomena *power swing* difokuskan pada sistem Paiton yang mencakup saluran dan GI terkait, dalam hal ini adalah saluran Paiton – Kediri, Paiton – Grati, Kediri – Pedan, Grati – Surabaya Barat, Pedan – Kesugihan, GITET Paiton, Kediri, Grati, Surabaya Barat, Pedan, dan Kesugihan. Gangguan yang disimulasikan adalah N-1-1 saluran Paiton – Grati yang dipicu oleh hubung singkat tiga fasa di sirkuit 1. Tujuan akhir dari mitigasi ini adalah rekomendasi penanganan fenomena *power swing* dengan memperhatikan stabilitas sistem dan parameter – parameter sistem beroperasi pada standar yang telah ditentukan. Parameter – parameter tersebut antara lain frekuensi dan tegangan.

Sebelum menentukan mitigasi yang tepat, dilakukan pemodelan sistem dari mulai pemodelan parameter dinamik generator, saluran, IBT (*inter-bus transformer*), dsb sehingga didapatkan hasil simulasi yang mendekati kondisi di lapangan. Beberapa mitigasi yang diujicobakan dan dianalisa antara lain

1. Pemasangan TCSC di saluran Paiton – Kediri
2. Pemasangan TCSC dan intertrip reactor
3. Penambahan saluran
4. Penambahan saluran dan intertrip reactor
5. Dispatch pembangkit dengan memperhatikan stabilitas sistem

4.1 Analisa Kondisi Eksisting

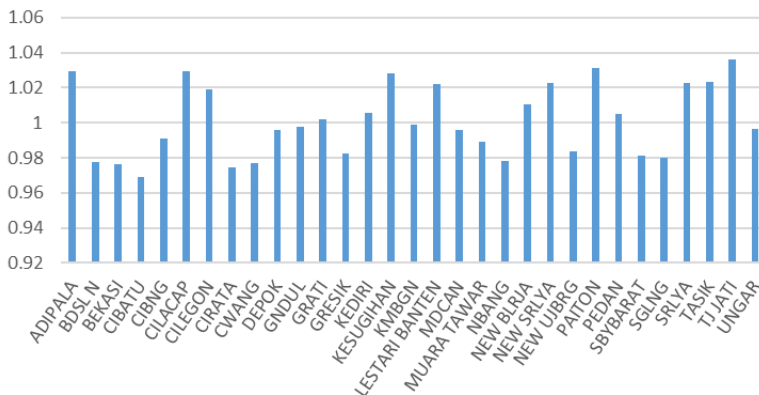
Analisa kondisi eksisting diperlukan untuk menjadi acuan kondisi sistem sebelum mengalami gangguan / sebelum munculnya fenomena *power swing*. Analisa yang dilakukan adalah analisa *load flow*, hubung singkat, dan *power transfer capability* sebelum dilakukan mitigasi.

4.1.1 Simulasi *Load Flow*

Simulasi *load flow* dilakukan merujuk pada data hasil pembacaan SCADA pukul 13.30 (beban puncak siang). Pada pemodelan awal, parameter – parameter (tegangan, pembangkitan, on / off reactor) disesuaikan sedemikian rupa sehingga nilainya sama antara hasil simulasi dan pembacaan SCADA.

Pada tugas akhir ini dilakukan penyesuaian scenario operasi pada pola pembangkitan di beberapa *plant* pembangkit. Skenario operasi ini diberi nama “Kemarau Paiton”. Hal ini bertujuan untuk menyesuaikan dengan kondisi *real* sebelum terjadinya *power swing*. Pada skenario kemarau Paiton ini, pembangkit PLTA banyak yang tidak beroperasi. PLTA Saguling hanya beroperasi 1 unit dari total 4 unit, pun demikian dengan PLTA Cirata, yakni hanya 1 unit yang beroperasi dari total 8 unit pembangkit di *plant* Cirata. Selanjutnya, daya yang hilang akibat tidak beroperasinya beberapa unit PLTA dilimpahkan ke PLTU Paiton.

Dari hasil simulasi aliran daya (*load flow*) didapatkan data bahwa sistem ini memiliki total pembangkitan sebesar 12.075 MW dengan beban sebesar 11.910 MW dan *spinning reserve* sebesar 10.829,66 MW. Nilai tegangan, aliran daya tiap saluran, nilai pembangkitan dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut ini.



Gambar 4.1. Grafik tegangan bus kondisi eksisting

Dari grafik diatas dapat diketahui kondisi eksisting tegangan tiap bus masih dalam rentang standar tegangan yaitu $\pm 5\%$ dari tegangan nominal. Beberapa bus pembangkit di sisi timur di atur lebih tinggi (lebih dari 1 p.u) agar tegangan disisi barat dapat memenuhi standar. Bus tersebuta antara lain bus Paiton, Cilacap, dan Tanjung Jati. Selain itu terdapat beberapa bus cenderung memiliki tegangan yang relatif rendah, yaitu bus Bekasi, Cawang, Cibatu. Hal ini disebabkan karena daerah tersebut merupakan daerah pusat beban, dimana daerah tersebut memiliki porsi beban industri yang cukup besar sehingga kebutuhan daya reaktifnya juga cukup besar.

Tabel 4.1. Aliran daya pada saluran transmisi

Nama Saluran	Bus i	Bus j	Aliran Daya		Loading [%]
			P [MW]	Q [MVAR]	
ADIPALA-CILACAP 1	ADIPALA	CILACAP	-282.48	-35.42	9.8576
ADIPALA-CILACAP 2	ADIPALA	CILACAP	-282.48	-35.42	9.8576
BDSL N-NEW UJBRG	BDSL N	NEW UJBRG	-476.64	-109.4	24.068
BEKASI-CIBNG	BEKASI	CIBNG	-718.34	-266.6	45.757
CBNG-DEPOK 1	CIBNG	DEPOK	-573.13	-232.1	36.384
CBNG-DEPOK 2	CIBNG	DEPOK	-573.13	-232.1	36.384
CILEGON - CIBINONG	CILEGON	CIBNG	572.7	98.457	28.966
CIRATA-CIBATU 1	CIRATA	CIBATU	137.8	101.41	7.4337
CIRATA-CIBATU 2	CIRATA	CIBATU	116.77	86.192	6.4392
CIRATA-SGLNG 1	CIRATA	SGLNG	-318.43	-152.7	21.13
CIRATA-SGLNG 2	CIRATA	SGLNG	-318.43	-152.7	21.13
CWANG-BEKASI	BEKASI	CWANG	96.119	-32.61	6.0615
DEPOK-TASIK 1	DEPOK	TASIK	-395.54	-164.3	25.085
DEPOK-TASIK 2	DEPOK	TASIK	-395.54	-164.3	25.085
GNDUL-DEPOK 1	GNDUL	DEPOK	431.04	177.11	27.412
GNDUL-DEPOK 2	GNDUL	DEPOK	431.04	177.11	27.412

Tabel 4.1 Aliran daya saluran pada saluran transmisi (lanjutan 2)

Nama Saluran	Bus i	Bus j	Aliran Daya		Loading [%]
			P [MW]	Q [MVAR]	
GRATI-SBY BARAT 1	GRATI	SBYBARAT	574.29	118.19	29.261
GRATI-SBY BARAT 2	GRATI	SBYBARAT	574.29	118.19	29.261
KESUGIHAN- ADPALA 1	KESUGIHAN	ADIPALA	-282.4	-50.5	9.9411
KESUGIHAN- ADPALA 2	KESUGIHAN	ADIPALA	-282.4	-50.5	9.9411
KESUGIHAN- PEDAN 1	PEDAN	KESUGIHAN	181.8	-221.3	13.714
KESUGIHAN- PEDAN 2	KESUGIHAN	PEDAN	-180.99	26.99	13.72
KMBGN-GNDUL 1	KMBGN	GNDUL	-77.514	27.024	4.6447
KMBGN-GNDUL 2	KMBGN	GNDUL	-77.514	27.024	4.6447
LBE-NEW BLRJA 1	LESTARI BANTEN	NEW BLRJA	743.48	134.78	36.046
LBE-NEW BLRJA 2	LESTARI BANTEN	NEW BLRJA	743.48	134.78	36.046
MDCAN-BDSL N	BDSL N	MDCAN	-487.27	-107	29.761
MDCAN-NEW UJBRG	MDCAN	NEW UJBRG	480.76	-3.689	28.757
MTAWAR- CIBATU 1	MUARA TAWAR	CIBATU	373.54	-11.36	19.084
MTAWAR- CIBATU 2	MUARA TAWAR	CIBATU	388.03	315.5	31.282
M TAWAR-CIBNG	MUARA TAWAR	CIBNG	-114.87	-42.54	7.22
M TAWAR- CWANG	CWANG	MUARA TAWAR	-565.28	-220.6	36.227
NEW BLRJA- GNDUL 1	NEW BLRJA	GNDUL	722.6	160.55	43.354
NEW BLRJA- GNDUL 2	NEW BLRJA	GNDUL	722.6	160.55	43.354
NEW SRLYA-LBE 1	NEW SRLYA	LESTARI BANTEN	427.2	157.02	26.001
NEW SRLYA-LBE 2	NEW SRLYA	LESTARI BANTEN	427.2	157.02	26.001
NEW SRLYA- SRLYA	NEW SRLYA	SRLYA	-286.81	-108.8	14.436
PAITON-GRATI 1	PAITON	GRATI	727.97	216.78	36.788
PAITON-GRATI 2	PAITON	GRATI	727.94	216.76	36.786

Tabel 4.1 Aliran daya saluran pada saluran transmisi (lanjutan 2)

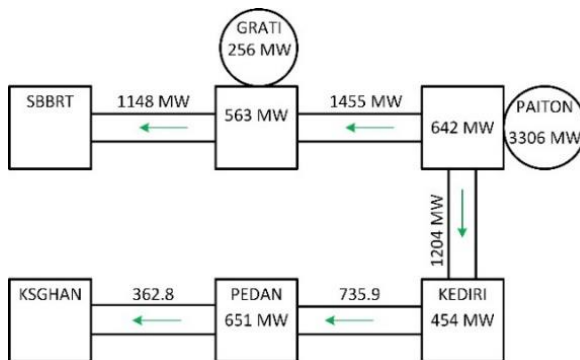
Nama Saluran	Bus i	Bus j	Aliran Daya		Loading [%]
			P [MW]	Q [MVAR]	
PAITON-KEDIRI 1	PAITON	KEDIRI	602.1	-12.98	29.089
PAITON-KEDIRI 2	PAITON	KEDIRI	602.69	-12.76	29.118
PEDAN-KEDIRI 1	KEDIRI	PEDAN	367.97	-118.9	18.506
PEDAN-KEDIRI 2	KEDIRI	PEDAN	367.97	-118.9	18.506
SBY BARAT-GRESIK 1	SBYBARAT	GRESIK	-170.18	-33.47	10.309
SBY BARAT-GRESIK 2	SBYBARAT	GRESIK	-170.18	-33.47	10.309
SBYBARAT-NBANG	NBANG	SBYBARAT	-152.03	-65.6	9.874
SBYBARAT-UNGAR	SBYBARAT	UNGAR	209.35	-195.2	17.011
SGLNG-BDSL N 1	SGLNG	BDSL N	-172.05	49.377	9.4362
SGLNG-BDSL N 2	SGLNG	BDSL N	-172.05	49.377	9.4362
SGLNG-CBNG 1	CIBNG	SGLNG	140.67	75.941	9.5567
SGLNG-CBNG 2	CIBNG	SGLNG	137.44	72.816	9.9447
SRLYA-CILEGON 1	SRLYA	CILEGON	602.5	171.33	29.652
SRLYA-CILEGON 2	SRLYA	CILEGON	602.5	171.33	29.652
SRLYA-NEW BLRJA 1	SRLYA	NEW BLRJA	591.9	89.11	34.843
SRLYA-NEW BLRJA 2	SRLYA	NEW BLRJA	591.9	89.11	34.843
TASIK-KESUGIHAN 1	TASIK	KESUGIHAN	-462.22	-67.78	21.962
TASIK-KESUGIHAN 2	TASIK	KESUGIHAN	-462.22	-67.78	21.962
TJATI-UNGAR 1	UNGAR	TJ JATI	-927.6	-167.8	55.168
TJATI-UNGAR 2	UNGAR	TJ JATI	-927.6	-167.8	55.168
UNGAR-MDCAN 1	MDCAN	UNGAR	-534.18	-22.84	32.574
UNGAR-MDCAN 2	MDCAN	UNGAR	-534.18	-22.84	32.574
UNGAR-NBANG	- UNGAR	- NBANG	0	0	0
UNGAR-PEDAN	UNGAR	PEDAN	285.5	-157.7	15.747

Tabel 4.1 menunjukkan data aliran daya tiap saluran sistem Jawa Bali 500kV secara tabular. Data aliran daya tersebut juga ditampilkan secara grafis melalui gambar pada lampiran 1.

Dari tabel 4.1 dan gambar 4.2 dapat diketahui aliran daya tiap saluran, beban tiap GITET dan nilai pembangkitan tiap *plant*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi tersebut tidak ada saluran yang mengalami overload (pembebanan lebih dari 80% dari kapasitas thermal). Sebagaimana disebutkan sebelumnya, pada tugas akhir ini akan difokuskan pada kondisi sistem Paiton dan bus – bus terkait, dalam hal ini adalah saluran Paiton – Grati, Paiton – Kediri, Kediri – Pedan, Pedan – Kesugihan, Grati – Surabaya Barat.

Pada scenario operasi ini, pembangkit PLTU Paiton membangkitkan daya sebesar 3306 MW dengan beban pada IBT Paiton sebesar 642 MW. Unit pembangkit yang aktif adalah Paiton U2, Paiton U3, JP U5, PEC U7, PEC U8, Paiton U9. Sedangkan *plant* PLTGU Grati membangkitkan daya sebesar 256 MW dengan beban IBT Grati sebesar 563 MW. Dilihat dari aliran dayanya, dari bus Paiton ke Kediri mengalir daya sebesar 1204 MW (2×602 MW), sedangkan dari bus Paiton ke Grati mengalir daya sebesar 1455 MW (2×727 MW).

Dari data tersebut, dapat diketahui bahwa pembangkitan Paiton cukup besar dan sebagian besar daya yang dibangkitkan dialirkan melalui saluran Paiton – Grati.



Gambar 4.2. Aliran daya sistem Paiton pada kondisi eksisting

4.1.2 Simulasi Hubung Singkat

Pada simulasi ini dilakukan analisa hubung singkat pada tiap bus 500 kV. Jenis hubung singkat yang di ujikan adalah hubung singkat 3 fasa dengan $Z_f = 0 \Omega$. Sedangkan metode yang digunakan adalah metode IEC 60909 tahun 2001.

Tabel 4.2. Nilai arus hubung singkat tiap bus

Bus	Ik" [kA]	Bus	Ik" [kA]
ADIPALA	17.66215	LESTARI BANTEN	42.94345
BDSL N	28.89685	MDCAN	19.23447
BEKASI	31.20537	MUARA TAWAR	44.54472
CIBATU	34.21217	NBANG	13.69162
CIBNG	48.57823	NEW BLRJA	38.92927
CILACAP	17.32465	NEW SRLYA	43.6665
CILEGON	38.77379	NEW UJBRG	19.06966
CIRATA	36.15483	PAITON	36.02547
CWANG	30.16439	PEDAN	19.21624
DEPOK	45.45797	SBYBARAT	27.19978
GNDUL	43.59069	SGLNG	38.51125
GRATI	30.01986	SRLYA	44.6126
GRESIK	25.69292	TASIK	16.28541
KEDIRI	15.71675	TJ JATI	20.60233
KESUGIHAN	18.1349	UNGAR	25.46968
KMBGN	28.49069		

Dari tabel diatas didapatkan hasil nilai Ik" (Initial Short Circuit Current) tiap bus. Nilai tersebut sudah dikomparasikan dengan nilai Ik" yang dimiliki oleh PLN. Hasil komparasi menunjukkan error 0.019% - 6%, dengan rata – rata eror sebesar 2.3 %

4.2 Simulasi Gangguan

Pada subbab ini akan dilakukan simulasi gangguan yang memicu munculnya fenomena *power swing* dan dampaknya ke sistem. Jenis gangguan yang diterapkan mengacu pada historis gangguan yang pernah terjadi di sistem Jawa Bali 500 kV yakni gangguan N-1-1 saluran Paiton

– Grati. Kondisi sistem sebelum terjadinya gangguan juga di atur sedemikian rupa sehingga mendekati kondisi di lapangan.

Sebagaimana dijelaskan pada subbab 4.1, kondisi eksisting sebelum terjadi gangguan adalah sebagai berikut

1. Pembangkitan Paiton 3306 MW
2. Pembangkitan Grati 256 MW
3. Aliran daya Paiton – Kediri 2x602 MW
4. Aliran daya Paiton Grati – 2x727 MW
5. Unit Paiton aktif (*in service*) adalah Paiton U2, Paiton U3, JP U5, PEC U7, PEC U8, Paiton U9

Agar dapat terjadi kasus kontingensi N-1-1 pada saluran Paiton - Grati, perlu adanya gangguan yang dapat memicu terjadinya kontingensi N-1. Pada simulasi ini kontingensi N-1 dipicu oleh hubung singkat 3 fasa pada sirkuit 1 saluran Paiton Grati. Kemudian diikuti trip sirkuit 1 Paiton Grati. Setelah sirkuit 1 trip, dilakukan trip pada sirkuit 2 saluran Paiton – Grati. Berikut ini adalah rincian kronologi awal gangguan.

Tabel 4.3. Urutan event pada simulasi

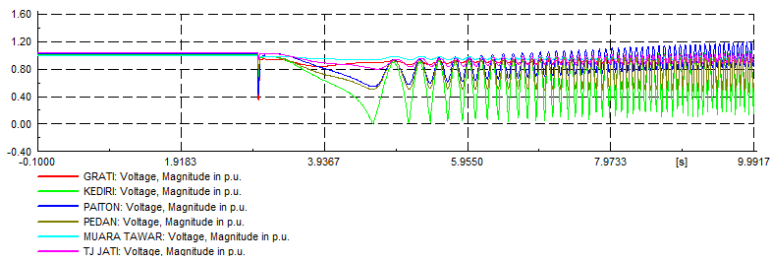
No	Waktu (s)	Event	Element	Event defined by
1.	3	SC3 phase	Paiton-Grati #1	Pre-defined
2.	3.023076	CB trip	Cub Paiton	Relay Jarak Paiton-Grati #1
3.	3.023076	CB trip	Cub Grati	Relay Jarak Grati-Paiton #1
4.	3.1	Line Trip	Paiton-Grati #2	Pre-defined

Pada detik ke 3 didefinisikan terjadi gangguan 3 fasa pada sirkuit 1 Paiton – Grati. Selanjutnya Pada detik ke 3.023076 relay jarak pada kubikel Paiton dan Grati memberi sinyal trip kepada CB saluran Paiton – Grati sirkuit 1 (sirkuit yang mengalami gangguan hubung singkat). Selanjutnya pada detik ke 3.1 didefinisikan terjadi line trip pada sirkuit 2 saluran Paiton – Grati. Dari rangkaian kejadian ini kontingensi N-1-1 dapat di modelkan.

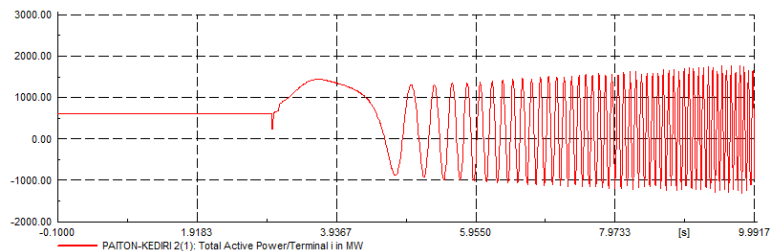
4.2.1 Fenomena *Power swing*

Setelah dilakukan pemodelan gangguan N-1-1 pada saluran Paiton – Grati, dilakukan analisa kondisi sistem. Pada tahap ini, peralatan

proteksi berupa relay jarak dan *out-of-step protection* di non aktifkan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui respon sistem setelah terjadi gangguan dengan waktu analisa yang lebih lama. Gambar 4.4 menunjukkan grafik tegangan dan aliran daya pada saluran Paiton – Kediri. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa terdapat osilasi baik dari nilai tegangan maupun aliran daya. Osilasi tegangan paling signifikan terjadi pada bus Paiton, Kediri, dan Pedan. Osilasi daya yang sangat parah juga terjadi pada saluran Paiton – Kediri, dimana amplitudo osilasinya mencapai ± 1000 MW. Kondisi inilah yang disebut fenomena *power swing*, dimana terjadi osilasi daya aktif dan reaktif pada saluran transmisi akibat adanya gangguan besar.

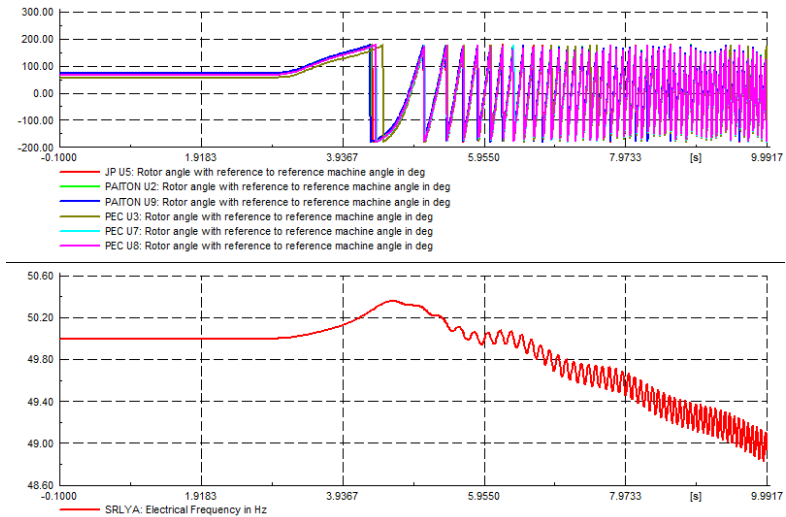


Gambar 4.3. Tegangan bus setelah kontingensi N-1-1



Gambar 4.4. Aliran daya Paiton – Kediri setelah kontingensi N-1-1

Selain dari sisi tegangan dan aliran daya, osilasi juga terjadi pada nilai sudut rotor kit Paiton dan frekuensi sistem, sebagaimana terlampir pada gambar 4.5. Dilihat dari sisi frekuensi terjadi penurunan nilai frekuensi dengan osilasi. Nilai tertinggi dari osilasi tersebut berada pada nilai 50,359 Hz sedangkan nilai frekuensi terendah yaitu 48,8 pada detik ke 10.



Gambar 4.5. Plot respon sudut rotor dan frekuensi sistem

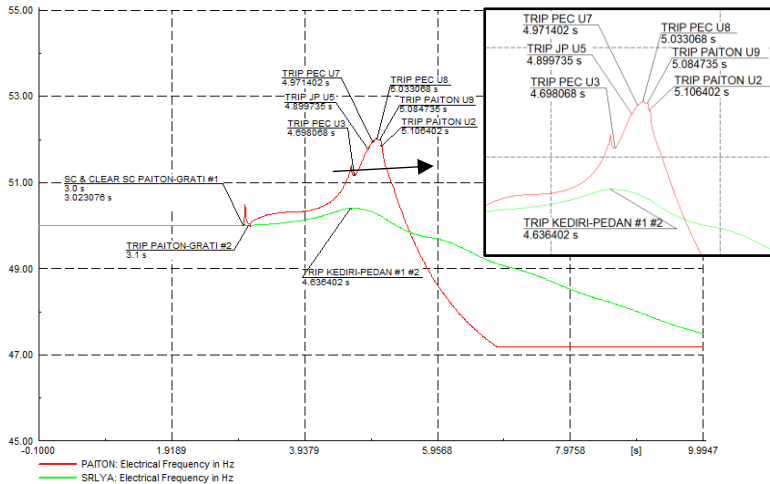
Dari gambar 4.5 dan 4.4 menunjukkan adanya osilasi yang cukup besar pada beberapa parameter sistem tenaga. Saat terjadi gangguan, parameter persamaan sistem tenaga akan mengalami perubahan. Gangguan short circuit dan line trip pada saluran Paiton – Grati akan menyebabkan terjadinya perubahan reaktansi ekuivalen antara generator dan beban. Pada kasus ini, reaktansi akan meningkat secara mendadak. Pada kondisi ini, daya mekanik yang terdapat pada turbin generator Paiton tidak dapat merespon perubahan kebutuhan daya secara cepat, atau dapat dikatakan bahwa daya mekanik pada generator paiton tidak mencukupi daya yang dibutuhkan beban secara mendadak. Akibatnya sudut rotor generator di Paiton akan membesar hingga melebihi batas kestabilannya. Saat sudut rotor ini melebihi batas kestabilannya, akan terjadi osilasi akibat generator mengalami *out-of-step*. Osilasi sudut rotor ini menjadi penyebab terjadinya *power swing*.

Power swing ini bisa menjadi fenomena yang sangat merugikan dan membahayakan bagi sistem karena dapat menyebabkan sistem blackout secara keseluruhan maupun parsial. Dampak – dampak yang

muncul setelah terjadi *power swing* pada saluran Paiton – Kediri akan dibahas pada subsubbab berikut ini.

4.2.2 Dampak *Power swing*

Pada subsubbab ini akan dibahas mengenai dampak setelah munculnya *power swing* pada saluran Paiton – Kediri akibat kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati. Kontingensi ini menyebabkan beberapa event antara lain trip saluran, *generator out-of-step*, dan *under frequency* pada sistem.

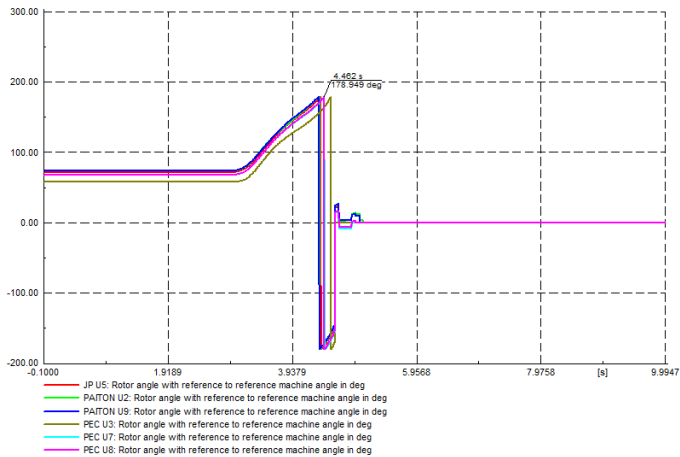


Gambar 4.6. Plot frekuensi dan urutan kejadian

Gambar diatas menunjukkan grafik frekuensi berbanding dengan waktu. Garis warna merah merupakan frekuensi di bus Paiton, dan garis warna hijau adalah frekuensi sistem yang diambil di bus Suralaya. Waktu simulasi yang diambil adalah dari rentang 0 – 10 detik. Awal simulasi dari detik 0 ke 3 tidak ada event apapun, dalam artian sistem berada pada kondisi normal dengan frekuensi sistem 50 Hz. Kemudian pada detik ke 3 terjadi hubung singkat 3 fasa pada saluran Paiton – Grati sirkuit 1. Gangguan ini dideteksi oleh relay jarak dan dilokalisir dengan cara melakukan trip di tiap ujung saluran secara *instantaneous*. Pada kondisi ini, terjadi lonjakan (*spike*) frekuensi di bus paiton, namun masih

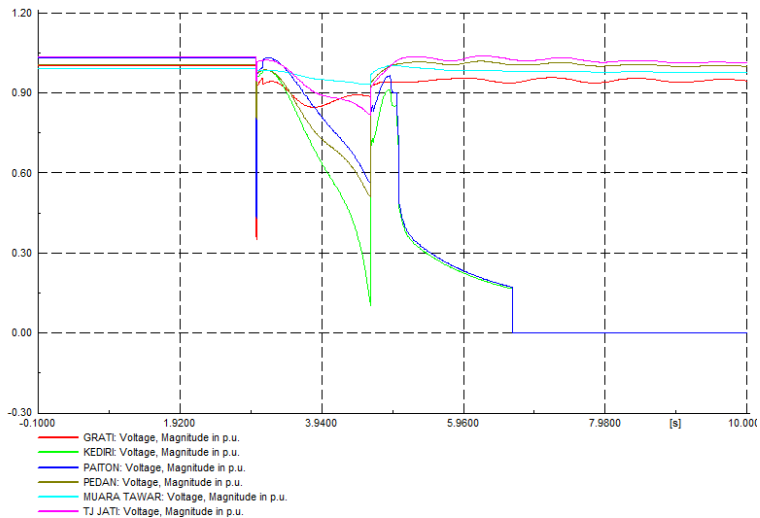
dalam range standar operasi. Pada detik 3.1 saluran paiton – grati sirkuit 2 mengalami trip.

Lepasnya saluran Paiton – Grati sirkuit 2 mengakibatkan hanya ada 1 saluran yang dapat mentransfer daya dari paiton, yaitu saluran Paiton – Kediri #1 #2. Detik selanjutnya, frekuensi di bus paiton mengalami lonjakan yang cukup besar. Hal ini diakibatkan oleh terbatasnya kemampuan transfer daya dari paiton ke sistem melalui saluran Paiton Kediri #1 #2. Daya yang dibangkitkan di paiton tidak dapat di transfer sepenuhnya, sehingga mengakibatkan daya yang dibangkitkan lebih besar dari daya beban ($P_{gen} > P_{load}$). Generator Paiton tidak dapat merespon perubahan ini secara cepat. Dilihat dari sisi nilai sudut rotor (lihat gambar 4.7), besar sudut rotor di semua unit pembangkit paiton mengalami kenaikan dan penurunan hingga mencapai $\pm 178^\circ$. Pada titik inilah sebagian besar unit Paiton tidak dapat mempertahankan kestabilannya akibat sudut rotor yang terlalu besar.

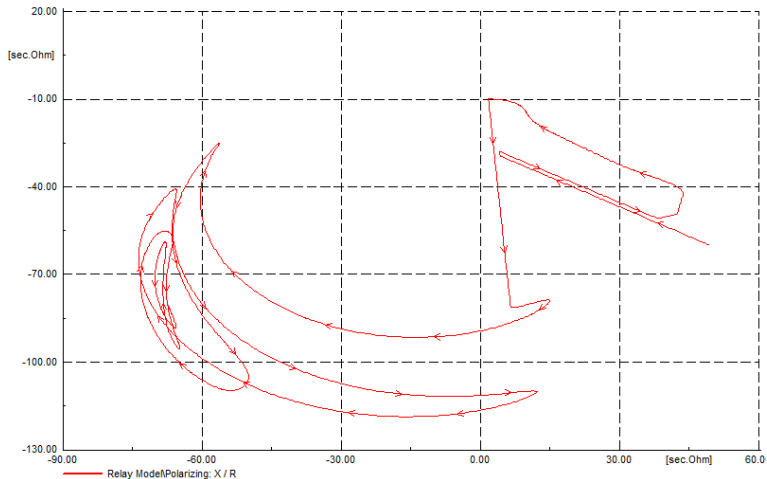


Gambar 4.7. Respon sudut rotor kit Paiton

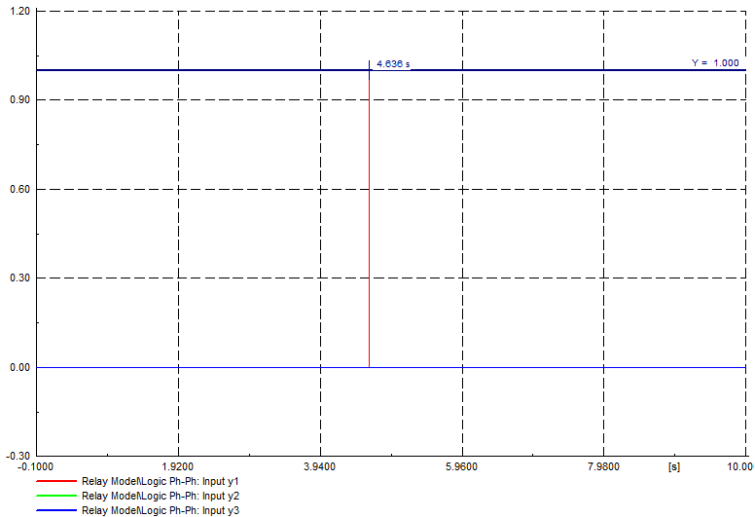
Pada detik ke 4.636402 relay jarak saluran Kediri – Pedan 1 dan 2 yang terpasang pada kubikel bus Kediri memberi sinyal trip kepada CB saluran Kediri – Pedan (Cub Kediri). Akibatnya saluran Kediri – Pedan lepas. Normalnya, relay jarak tersebut tidak akan memberi sinyal trip pada kondisi ini karena tidak ada gangguan hubung singkat pada saluran.



Gambar 4.8. Respon tegangan sistem setelah gangguan N-1-1 Paiton – Grati



Gambar 4.9. Trajectory impedansi yang terbaca oleh relay jarak



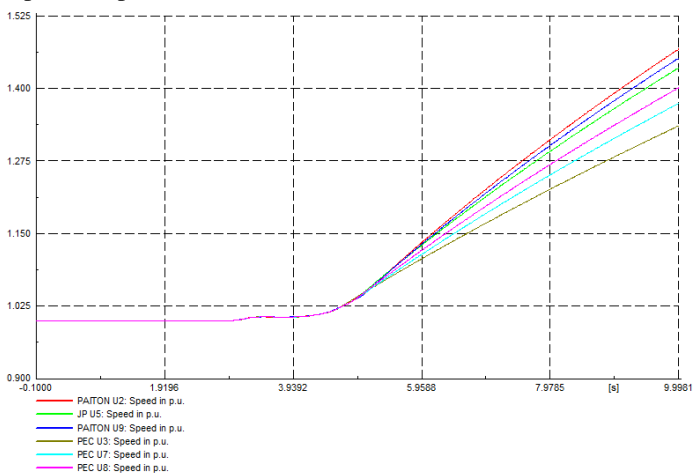
Gambar 4.10. Respon logic relay jarak di cubicle Kediri untuk saluran Kediri-Pedan

Gambar 4.8 menunjukkan respon tegangan. Gambar 4.9 menunjukkan grafik *trajectory* impedansi yang terbaca oleh relay jarak saluran Kediri – Pedan pada kubikel Kediri. Sedangkan gambar 4.10 menunjukkan respon logic relay jarak untuk logic tiap zona proteksi. Ketiga gambar tersebut saling berkorelasi satu sama lain dan dapat menjadi parameter yang bisa menunjukkan penyebab tripnya saluran Kediri – Pedan. Dilihat dari parameter tegangan, tegangan bus Kediri (garis warna hijau) mengalami penurunan tegangan yang sangat drastis. Penurunan tegangan ini menyebabkan impedansi yang terbaca oleh relay jarak berubah dan semakin mengecil, sebagaimana persamaan ($Z_R = V_R/I_R$). Perubahan impedansi yang terbaca oleh relay jarak membentuk sebuah jejak yang disebut *trajectory* impedansi. *Trajectory* ini terdiri dari komponen R dan X. Pada bidang *trajectory* (gambar 4.9) terlihat bahwa terdapat jejak nilai impedansi yang memiliki perubahan arah dan nilai yang signifikan. Pada kondisi inilah tegangan pada bus Kediri mencapai titik terendahnya yakni pada detik ke 4,62. Akibat nilai impedansi yang sangat kecil ini, relay jarak mendeteksi adanya gangguan hubung singkat

pada saluran, karena nilai impedansinya masuk kedalam zona proteksi relay jarak.

Untuk mengetahui zona proteksi mana yang mendeteksi gangguan, dapat dengan cara melihat respon logic tiap zona. Dari gambar 4.10 dapat diketahui bahwa logic zona 1 (garis warna merah) mengirim logika yang bernilai satu pada detik ke 4.63.. Hal ini berarti bahwa relay jarak mendeteksi adanya gangguan pada zona satu dan melakukan trip secara *instantaneous*.

Dari gambar 4.6, setelah lepasnya saluran Kediri - Pedan, frekuensi di bus paiton mengalami kenaikan. Hal ini disebabkan karena paiton dan Kediri seolah-olah membentuk sistem kecil yang terdiri dari generator Paiton, beban Paiton, dan beban Kediri dimana pembangkitan di Paiton jauh lebih besar dari kebutuhan beban. Akibatnya generator di plant Paiton mengalami *overspeed* dan kemudian diikuti dengan lepasnya generator Paiton U2, Paiton U3, JP U5, PEC U7, PEC U8, Paiton U9 akibat generator mengalami *out-of-step*. Dengan trip nya semua generator di plant Paiton, bus Paiton dan Kediri tidak bertegangan. Selain itu, lepasnya Paiton dari sistem menyebabkan frekuensi sistem turun hingga mencapai 48.5 pada detik ke 8.



Gambar 4.11. Respon kecepatan putar kit Paiton

4.3 Mitigasi Gangguan

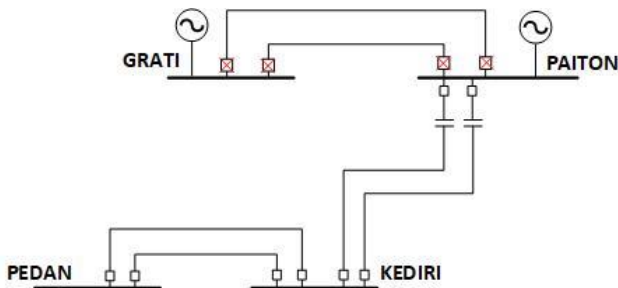
Pada subbab sebelumnya telah dijelaskan mengenai dampak – dampak *power swing* pada sistem Jawa Bali. Fenomena ini memicu kejadian yang berantai dan sangat berbahaya bagi kontinuitas penyaluran daya di sistem. Untuk mengantisipasi kejadian ini, perlu adanya upaya mitigasi. Pada subbab ini akan dibahas mengenai langkah – langkah mitigasi untuk menanggulangi dampak *power swing* di sistem Jawa Bali 500 kV. Beberapa jenis mitigasi yang dianalisa antara lain:

1. Pemasangan TCSC pada saluran Paiton Kediri
2. Pemasangan TCSC dan intertrip reaktor
3. Penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat
4. Penambahan saluran Bangil – Grati.

Respon sistem untuk masing – masing jenis mitigasi akan dianalisa untuk satu kasus yang sama, yaitu kasus N-1-1 Paiton – Grati.

4.3.1 Pemasangan TCSC

Berdasarkan uraian sebelumnya, salah satu penyebab munculnya *power swing* adalah akibat *line outage* saluran Paiton Grati dan terbatasnya kapasitas power transfer saluran Paiton Kediri. Dari aspek inilah ditarik langkah mitigasi dengan memasang FACTS Device dengan jenis TCSC (Thyristor Controlled Series Reactor). Menurut referensi [16], TCSC dapat digunakan untuk meningkatkan kemampuan power transfer pada saluran.



Gambar 4.12. Topologi sistem dengan pemasangan TCSC

TCSC ini dipasang di GITET Paiton dan dipasang secara seri terhadap saluran Paiton – Kediri sirkuit 1 dan 2. Dengan pemasangan TCSC ini diharapkan dapat mengkompensasi reaktansi saluran Paiton – Kediri sehingga dapat meningkatkan kemampuan power transfer. Berikut ini adalah tabel karakteristik saluran Paiton – Kediri untuk tiap sirkuit.

Tabel 4.4. Karakteristik saluran Paiton - Kediri

Jenis Konduktor	ACSR-GANNET 4X392.8mm
Kapasitas	2400 A
Resistansi (R1, R2)	0.0251 Ω /km
Reaktansi (X1,X2)	0.2808 Ω /km
Suseptansi (B1, B2)	4.049 uS/km
Panjang Saluran	209.1
Jumlah Sirkuit	2

Implementasi TCSC menggunakan blok controller yang sudah dimodelkan pada bab 3.1. Dari blok diagram diagram dibutuhkan parameter antara lain K_p , K_i , T_r , X_{km} , X_{cap} , Z_b , x_{min} , dan x_{max} . Parameter X_{km} , X_{cap} , Z_b , x_{min} , dan x_{max} mengacu pada saluran yang akan dikompensasi. Berikut ini adalah perhitungan nilai parameter – parameter tersebut.

a.) *Parameter Z_b (Base Impedance dalam ohm)*

ditentukan $MVA_{BASE} = 1 \text{ MVA}$

$$Z_b = \frac{kV^2}{MVA_b}$$

$$Z_b = \frac{500^2}{1}$$

$$Z_b = 250000 \Omega$$

b.) *Parameter X_{km} (reaktansi saluran dalam pu)*

$$X_{km} = \frac{\text{Panjang Saluran} \times \text{Reaktansi per km}}{Z_b}$$

$$X_{km} = \frac{209.1 \times 0.2808}{250000}$$

$$X_{km} = 0.0002348 \text{ pu}$$

c.) Parameter X_{cap} (Reaktansi fixed capacitor [pu])

$$X_{cap} = \frac{CF \times X_{km}}{Z_b}$$

$$X_{cap} = \frac{0.7 \times 0.0002348}{250000}$$

$$X_{cap} = 0.0001644 \text{ pu}$$

d.) Parameter x_{cmin} (minimum limit first order delay [pu])

$$x_{cmin} = \frac{x_{km}}{1 + CF_{ind}}$$

$$x_{cmin} = \frac{0.0002348}{1 + 0.2}$$

$$x_{cmin} = 0.0001957 \text{ pu}$$

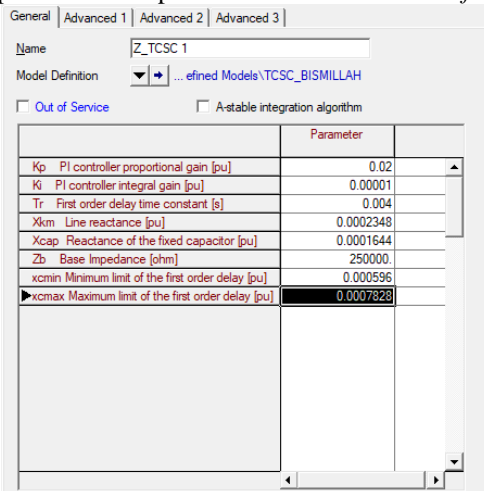
e.) Parameter x_{cmax} (minimum limit first order delay [pu])

$$x_{cmax} = \frac{x_{km}}{1 - CF_{cap}}$$

$$x_{cmax} = \frac{0.0002348}{1 - 0.7}$$

$$x_{cmax} = 0.0007828$$

Setelah didapatkan nilai nilai parameter tersebut, parameter tersebut diimpelmentasikan pada controller melalui *interface* berikut.



Gambar 4.13. *Interface* untuk mengisi parameter control TCSC pada DIgSILENT

Dalam penentuan nilai K_p , K_i , dan T_r digunakan metode tuning, yaitu dengan mencoba nilai – nilai setiap parameter hingga mendapatkan respon yang paling baik. Dari metode tuning tersebut didapatkan nilai $K_p = 0,02$ $K_i = 0,00001$ $T_r = 0,004$. Pada pengimplementasiannya, terdapat penyesuaian nilai x_{min} , dimana nilai x_{min} dinaikkan hingga 0.000596. Tujuan dari penyesuaian ini adalah agar TCSC tersebut lebih dominan beroperasi pada area kapasitif. Saat terjadi N-1-1 saluran Paiton Grati, terjadi lonjakan aliran daya yang besar melalui saluran Paiton – Grati, sehingga dibutuhkan kompensasi maksimal.

Selain dari sisi kontroller TCSC, tuning parameter juga dilakukan untuk blok kontroller uPOD (Power Oscillation Damper). uPOD ini cukup berperan dalam melakukan redaman osilasi daya yang mengalir di saluran Paiton – Kediri. Dari hasil tuning didapatkan parameter – parameter berikut.

		Parameter	
Kc	Stabilizer gain [pu]	0.1	▲
Tw	Washout time constant [s]	3.	
T1	Phase compensation time constant 1 [s]	0.1	
T2	Phase compensation time constant 2 [s]	0.08	
T3	Phase compensation time constant 3 [s]	0.085	
T4	Phase compensation time constant 4 [s]	0.08	
uPOD_min	Output minimum limit [pu]	-0.2	
▶uPOD_max	Output maximum limit [pu]	0.2	

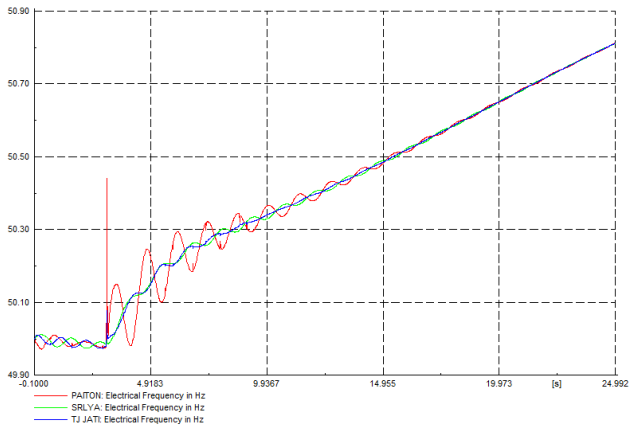
Gambar 4.14. *Interface* untuk mengisi parameter control uPOD pada DIgSILENT

Setelah didapatkan parameter – parameter yang tepat, kontroller TCSC dan uPOD tersebut di uji coba pada sistem dengan kasus N-1-1 saluran Paiton – Grati. Berikut adalah skenario event yang di gunakan.

Tabel 4.5. Urutan event pada simulasi

No	Waktu (s)	Event	Element	Event defined by
1.	3	SC 3 phase	Paiton-Grati #1	Pre-defined
2.	3.023081	CB trip	Cub Paiton	Relay Jarak Paiton-Grati #1
3.	3.023081	CB trip	Cub Grati	Relay Jarak Grati-Paiton #1
4.	3.1	Line Trip	Paiton-Grati #2	Pre-defined

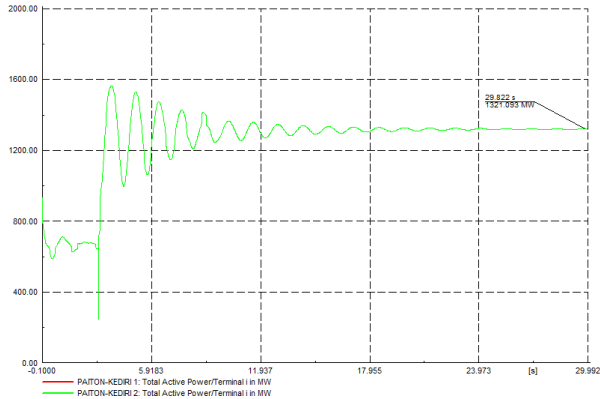
Respon sistem setelah terjadi gangguan dengan pemasangan TCSC pada saluran Paiton – Kediri terlampir pada grafik – grafik berikut.



Gambar 4.15. Respon frekuensi sistem setelah kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati dengan pemasangan TCSC

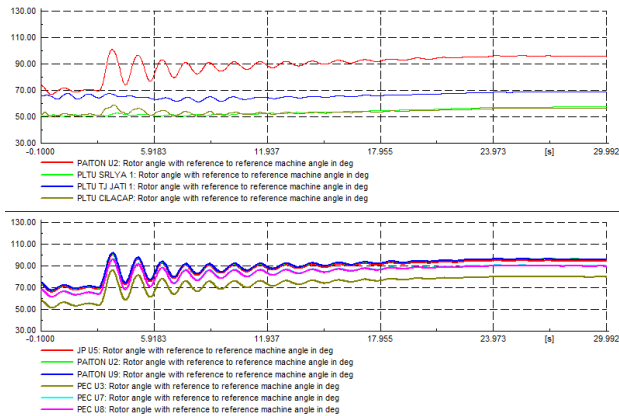
Gambar diatas menunjukkan nilai frekuensi sistem dari detik ke 0 – 25. Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa saat terjadi hubung singkat di saluran Paiton – Grati, terjadi lonjakan berupa spike pada bus Paiton. Pada detik selanjutnya terlihat adanya osilasi frekuensi di bus

Paiton, Suralaya, dan Paiton. Pada detik ke 3.1 – 18 osilasi tiap bus memiliki amplitude yang berbeda. Namun setelah detik ke 18, ketiga bus tersebut cenderung menuju nilai yang sama.



Gambar 4.16. Aliran daya saluran Paiton-Kediri setelah kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati dengan pemasangan TCSC

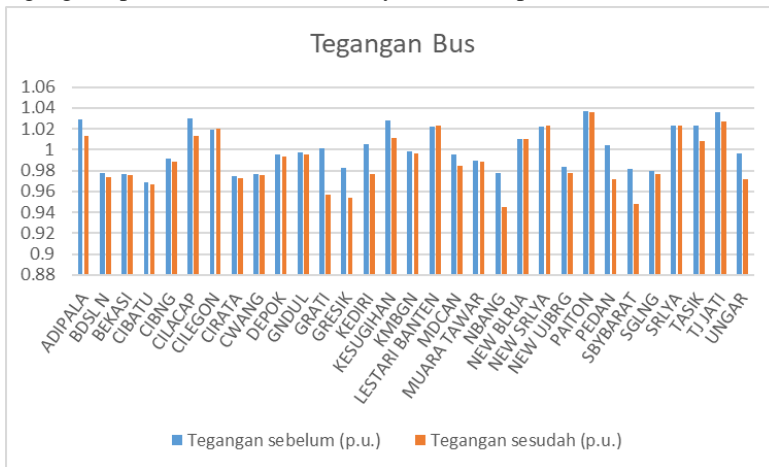
Dilihat dari sisi aliran daya saluran Paiton – Kediri, daya yang dibangkitkan di Paiton dapat tersalurkan sepenuhnya melalui saluran Paiton – Kediri. Setelah mencapai kondisi *steady state*, tiap sirkuit saluran Paiton – Kediri dapat mengalirkan daya sebesar sebesar 1321 MW, sehingga total daya yang di transfer dari Paiton adalah sebesar 2642 MW.



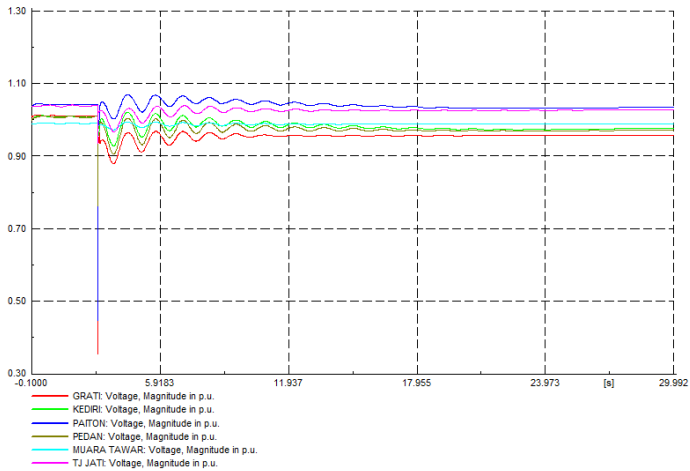
Gambar 4.17. Respon sudut rotor kit Paiton dan pembangkit besar

Gambar 4.17. menunjukkan bahwa ketika terjadi gangguan N-1-1 pada saluran Paiton – Grati, semua unit pembangkit di bus Paiton tetap dapat mempertahankan kestabilannya meskipun terjadi osilasi di detik detik awal. Selain unit pembangkit Paiton, pembangkit di bus Cilacap, Tanjung Jati, dan Suralaya juga tetap dapat mempertahankan kestabilannya. Saat mencapai kondisi *steady state*, sudut rotor di generator Paiton bervariasi pada range antara 79° - $95,9^\circ$. Generator di Tanjung Jati memiliki nilai sudut rotor $68,5^\circ$, Cilacap sebesar $56,17^\circ$, dan Suralaya sebesar $57,4^\circ$.

Gambar dibawah ini adalah respon tegangan bus setelah terjadi kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati. Setelah terjadi kasus N-1-1 saluran Paiton – Grati, hampir di semua bus mengalami penurunan tegangan. Penurunan tegangan yang paling drastis yakni pada bus Surabaya Barat dan Ngimbang dengan tegangan akhir sebesar 0.95 pu. Nilai ini dapat dikatakan sangat rendah karena mendekati batas minimal tegangan operasi sistem Jawa Bali, yakni ± 0.05 pu



Gambar 4.18. Grafik tegangan kondisi eksisting dan sesudah kontingensi dengan dilakukan pemasangan TCSC



Gambar 4.19. Plot respon tegangan bus setelah kontingensi dengan pemasangan TCSC .

Dari penjelasan – penjelasan dan melalui gambar – gambar diatas (gambar 4.15 , 4.16, 4.17, 4.18, 4.19), dapat disimpulkan bahwa fenomena *power swing* akibat kasus N-1-1 saluran Paiton – Grati dapat dihilangkan dengan pemasangan TCSC pada saluran Paiton – Kediri. Selain itu, dengan pemasangan TCSC, mal-trip pada relay jarak dapat dicegah, sehingga saluran tetap dapat mentransfer daya dengan generator yang tetap stabil. Meskipun *power swing* dan *mal-trip* dapat diatasi, pemasangan TCSC belum cukup untuk menyelamatkan sistem dan menjaga sistem tetap dalam standar operasi karena frekuensi sistem cenderung naik hingga mencapai 50.8 Hz pada detik ke 10 (lihat gambar 4.15) Naiknya frekuensi ini disebabkan oleh tegangan pada semua bus cenderung turun, sehingga daya beban turun. Sedangkan daya yang dibangkitkan oleh generator cenderung tetap. Oleh karena itu, perlu adanya mitigasi lanjutan yang dapat memastikan sistem tetap bekerja pada standar operasi.

4.3.2 Pemasangan TCSC dan Intertrip Reaktor

Pada subbab 4.3.1 dijelaskan bahwa dengan pemasangan TCSC belum dapat menyelamatkan sistem karena frekuensi sistem yang

cenderung naik dan melebihi standar. Pada subbab ini akan dilakukan mitigasi dengan cara mengkombinasikan pemasangan TCSC di saluran Paiton – Kediri dan intertrip reaktor.

Intertrip reaktor adalah cara untuk melakukan trip (open CB) reaktor secara jarak jauh. Intertrip reaktor ini dapat dilakukan memanfaatkan relay logic yang dipasang di kedua sirkuit Paiton – Grati. Ketika terjadi trip di kedua saluran Paiton – Grati, relay logic tersebut mengirim sinyal kepada CB reaktor tertentu untuk melakukan trip.

Pada kondisi eksisting sebelum terjadi kontingensi N-1-1, terdapat 13 reaktor yang aktif yang terpasang pada bus 66 kV (bus IBT) dan bus 500 kV. Berikut ini adalah data reaktor – reaktor tersebut.

Tabel 4.6. Reaktor yang terpasang pada sistem Jawa Bali

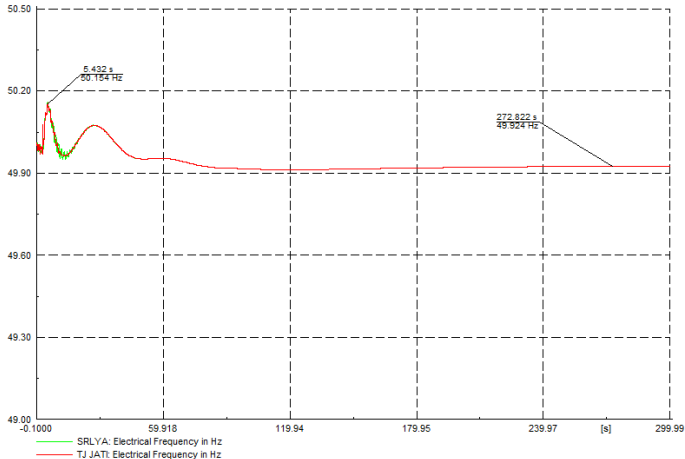
Nama Reaktor	Bus	Nominal kV	Kapasitas (MVAR)
Reaktor Ungaran 1	Ungaran	66	100
Reaktor Ungaran 2	Ungaran	66	100
Reaktor Paiton 1	Paiton	500	50
Reaktor Paiton 2	Paiton	500	50
Reaktor Depok 1	Depok	500	100
Reaktor Depok 2	Depok	500	100
Reaktor Pedan 1	Pedan	500	90
Reaktor Pedan 2	Pedan	500	90
Reaktor Sby Barat 1	Sby Barat	66	100
Reaktor Kediri 1	Kediri	500	106
Reaktor Kediri 2	Kediri	500	102
Reaktor Tasik 1	Tasik	500	100
Reaktor Tasik 2	Tasik	500	100

Pada skema ini, tidak dilakukan trip pada semua reaktor, namun hanya pada reaktor reaktor tertentu. Penentuan reaktor mana yang akan di trip kan berdasarkan dari hasil respon sistem. Trip yang dilakukan menyesuaikan kebutuhan sistem sehingga frekuensi dan tegangan sistem berada pada range standar yang digunakan. Berikut ini adalah skema intertrip reaktor yang digunakan

Tabel 4.7. Reaktor yang aktif (*in service*)

Nama Reaktor	Waktu (s)
Reaktor KEDIRI 1	4
Reaktor KEDIRI 2	4
Reaktor PEDAN 2	4.8
Reaktor PEDAN 1	4.8
Reaktor UNGARAN	5.5
Reaktor SBYBRT	5.8
Reaktor TASIK 1	5.8
Reaktor TASIK 2	5.8

Skema intertrip reaktor diatas dipadukan dengan scenario kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati dan pemasangan TCSC pada saluran Paiton – Kediri. Dari hasil pengimplementasian skema tersebut, didapatkan respon sistem yang digambarkan melalui grafik – grafik berikut ini.

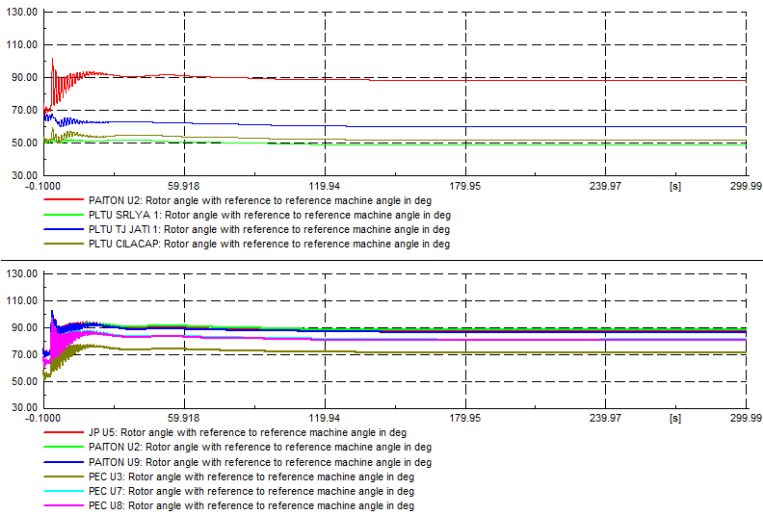


Gambar 4.20. Respon frekuensi sistem dengan pemasangan TCSC dan intertrip reaktor

Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa frekuensi sistem mengalami penurunan dibandingkan dengan mitigasi pada subbab 4.3.1. Pada detik – detik awal setelah terjadi kontingensi N-1-1 saluran Paiton –

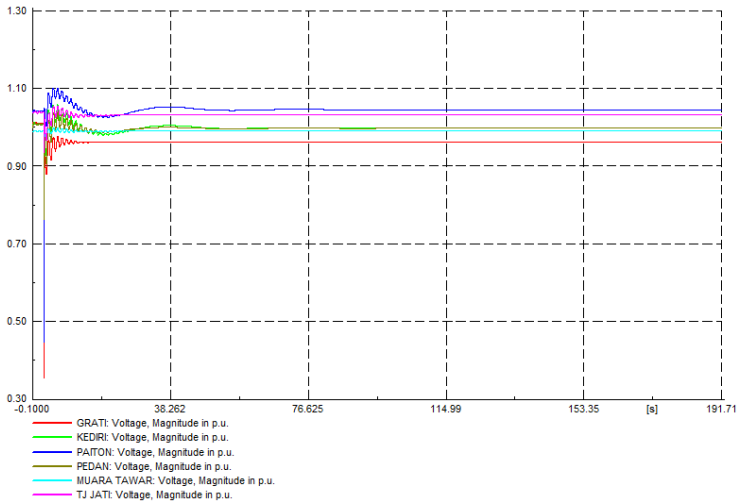
Grati dan intertrip reaktor, terjadi lonjakan frekuensi hingga mencapai 50.154 Hz. Pada 90 detik pertama frekuensi belum mencapai kondisi *steady state* yang baru, karena masih menunggu respon parameter dinamik generator untuk mencapai titik kestabilan yang baru. Setelah 120 detik waktu simulasi frekuensi mulai menuju nilai *steady state*, dan hingga detik ke 300 didapatkan nilai frekuensi *steady state* sebesar 49,924Hz.

Dilihat dari sisi aliran daya saluran Paiton – Kediri, tidak terdapat perubahan yang signifikan jika dibandingkan dengan mitigasi sebelumnya. Total daya yang di transfer melalui saluran ini sebesar 2642 MW. Pada kondisi ini, pembebanan saluran saluran Paiton – Kediri sebesar 62,2% dari kapasitas thermalnya.

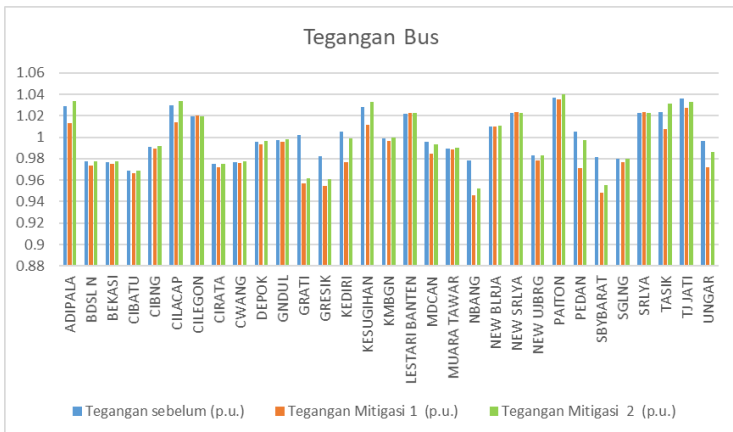


Gambar 4.21. Respon sudut rotor kit Paiton dan pembangkit – pembangkit besar

Gambar 4.21 menunjukkan bahwa dengan skema mitigasi ini, semua unit pembangkit di bus Paiton tetap dapat mempertahankan kestabilannya meskipun terjadi osilasi di detik - detik awal. Selain unit pembangkit Paiton, pembangkit di bus Cilacap, Tanjung Jati, dan Suralaya juga tetap dapat mempertahankan kestabilannya.



Gambar 4.22. Respon tegangan setelah pemasangan TCSC dan intertrip reaktor



Gambar 4.23. Grafik tegangan sebelum kontingensi, tegangan mitigasi 1, dan tegangan mitigasi 2

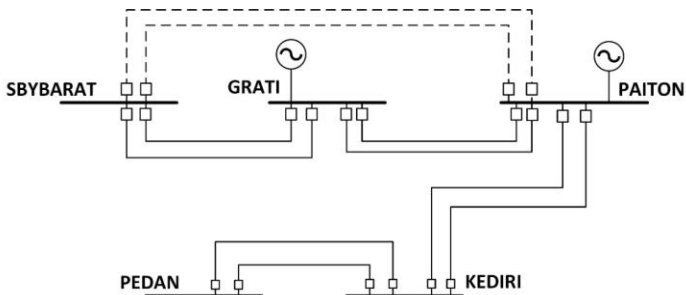
Dari grafik diatas dapat diketahui bahwa dengan skema intertrip reaktor dapat meningkatkan tegangan bus saat mencapai kondisi *steady state* nya. Hampir semua bus mengalami peningkatan tegangan dan sudah

tidak terdapat bus yang berada pada batas minimal tegangan operasi. Selain itu juga tidak terdapat bus yang mengalami overvoltage. Bus dengan tegangan yang relative rendah yakni bus Grati, Gresik, Surabaya Barat yang memiliki tegangan ± 0.96 pu. Sedangkan bus yang memiliki tegangan yang relative tinggi adalah bus Paiton, Cilacap, Adipala, dan Kesugihan yakni berkisar pada nilai ± 1.04 pu.

Dari pembahasan – pembahasan pada subbab ini, dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan mengkombinasikan pemasangan TCSC di saluran Paiton Grati, selain dapat menghilangkan fenomena *power swing*, juga dapat menjaga parameter frekuensi dan tegangan sesuai dengan standard an generator tetap dapat mempertahankan kestabilannya. Dengan melakukan intertrip reaktor, kebutuhan daya reaktif sistem akan berkurang sehingga tegangan bus dapat naik. Dengan naiknya tegangan bus, daya beban juga akan naik, sehingga dapat memudahkan sistem untuk mencapai kestimbangan baru ($P_{gen} = P_{load}$).

4.3.3 Penambahan Saluran Paiton – Surabaya Barat dan Penerapan OFGS (*Over Frequency Generator Shedding*)

Selain dengan meningkatkan kapasitas power transfer saluran transmisi, penanganan fenomena *power swing* akibat kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati dapat juga dengan menambah saluran dari Paiton menuju Surabaya Barat. Mitigasi ini digolongkan sebagai mitigasi jangka panjang, karena memerlukan pembangunan transmisi SUTET. Penambahan saluran ini diharapkan dapat meningkatkan stabilitas sistem Paiton.

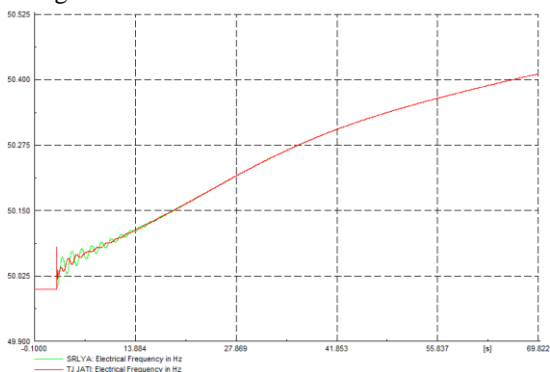


Gambar 4.24. Topologi sistem dengan penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat

Pada gambar diatas penambahan saluran digambarkan melalui garis putus – putus. Permodelan saluran baru ini menggunakan konduktor ACSR-GANNET 4X392.8mm *double circuit* dengan panjang 180,3 km (360,6 kms). Penentuan panjang saluran ini menggunakan asumsi penjumlahan panjang saluran Paiton – Grati dan Grati – Surabaya Barat, dimana masing - masing saluran ini memiliki panjang 87,9 km dan 92,4 km.

Pada mitigasi ini, skenario yang digunakan adalah kasus N-1-1 saluran Paiton – Grati dengan penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat, namun tanpa pemasangan TCSC pada saluran Paiton – Kediri. Dengan skema ini, diharapkan ketika saluran Paiton – Grati trip, aliran daya dapat dialihkan melalui saluran Paiton – Surabaya Barat.

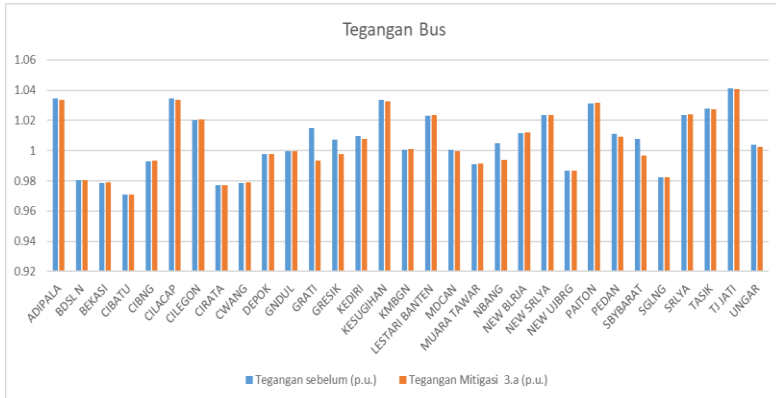
Respon sistem dari penerapan skenario ini direpresentasikan melalui grafik- grafik berikut ini.



Gambar 4.25. Respon frekuensi setelah penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa setelah trip-nya saluran Paiton – Grati, terjadi osilasi pada detik detik awal. Namun, hingga detik ke 70, frekuensi sitem cenderung naik terus menerus. Pada detik 70 frekuensi mencapai 50,4 Hz. Menurut referensi [13], nilai ini sudah melebihi batas maksimal operasi sistem Jawa Bali dimana batas frekuensi operasi adalah 50 ± 0.2 Hz. Dari hasil grafik ini, perlu dilakukan analisa kondisi tegangan tiap bus. Tujuannya adalah untuk mengetahui

apakah terjadi kasus undervoltage yang masif. Karena, tegangan yang rendah bisa menyebabkan tidak seimbangnya anatar Pgen dan Pload.



Gambar 4.26. Tegangan sebelum dan sesudah penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat

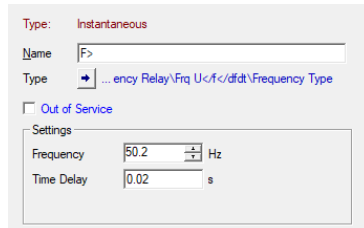
Dilihat dari persebaran nilai tegangan operasi bus, tidak terdapat bus yang undervoltage. Tegangan beberapa bus cenderung masih tinggi dan bisa mempertahankan tegangannya pada nilai yang relative tinggi. Bus yang memiliki tegangan yang relative tinggi antara lain Cilacap, Adipala, Kesugihan, dan Tanjung Jati. Ketiganya memiliki tegangan pada range 1.03 – 1.04 pu.

Jika mengacu pada kondisi tegangan sistem, tegangan tiap bus dikategorikan masih aman dan masih dalam standar. Namun, jika dilihat dari sisi frekuensi, kondisi sistem sudah tidak aman, karena frekuensi yang terus merangsek naik hingga mencapai 50.4 pada detik ke 70. Oleh karena itu, perlu dilakukan mitigasi lanjutan untuk mengatasi masalah ini. Mitigasi lanjutan yang diujicobakan adalah skema OFGS (*over frequency generator shedding*).

Tujuan dari mitigasi lanjutan ini adalah untuk mengurangi nilai pembangkitan pada sistem, sehingga frekuensi sistem dapat turun dan sesuai dengan standar operasi.

Pemodelan skema pelepasan generator ini menggunakan relay *Over Frequency Generator Shedding*. Relay ini akan memberi sinyal trip

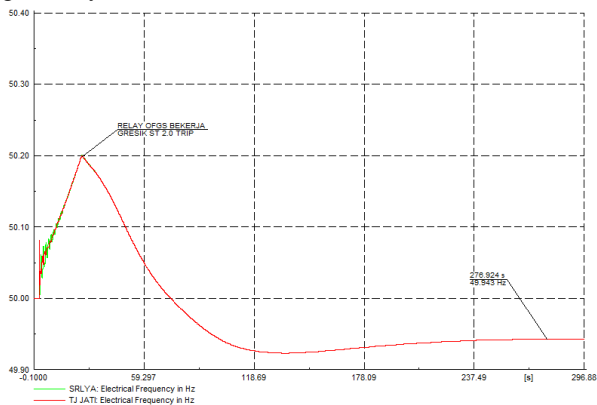
ketika terjadi over frekuensi pada sistem dengan *time delay* tertentu. Pada mitigasi ini diasumsikan pengaturan relay OFGS ini diatur pada frekuensi 50,2 Hz dengan *time delay* 0.02 detik.



Gambar 4.27. Pengaturan relay OFGS (Over Frequency Generator Shedding)

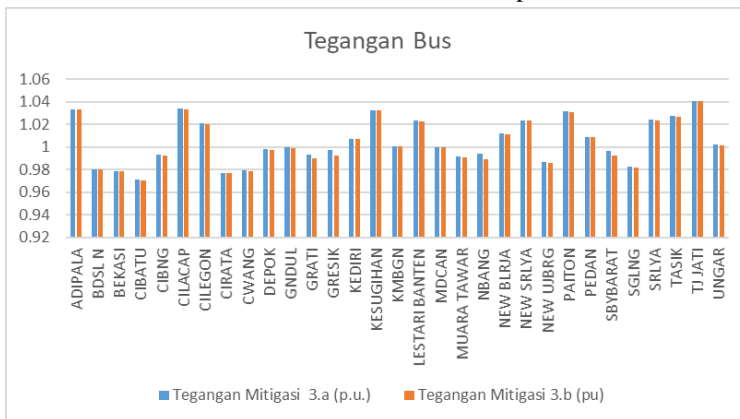
Setelah mendapatkan pemodelan relay OFGS, dilakukan penentuan porsi besaran daya (MW) yang harus dilepas sehingga sistem dapat kembali normal. Mengacu pada pola operasi kondisi eksisting, ditentukan total daya yang harus dilepas berkisar antara 70 – 80 MW. Sehingga ditentukan untuk melepas generator Gresik ST2.0 menggunakan relay OFGS tersebut.

Berikut ini adalah grafik respon sistem setelah dilakukan pengimplementasian penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat dan pemasangan relay OFGS.



Gambar 4.28. Respon frekuensi sistem setelah penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat dan OFGS

Dari gambar diatas, terdapat perubahan yang sangat signifikan setelah dipasang relay OFGS. Dari detik 3 – 26 frekuensi sempat beresilasi dan kemudian cenderung naik dan mencapai batas setting relay OFGS (50,2 Hz) pada detik ke ± 26 . Dan pada detik ke 26,072 relay OFGS mengirim sinyal trip pada generator Gresik ST2.0. Setelah tripnya Gresik ST2.0, frekuensi sistem mengalami penurunan hingga mencapai titik terendah yaitu 49,923 Hz. Pada detik ke 260, frekuensi mencapai titik *steady statenya* yakni pada nilai 49,942 Hz. Dari gambar diatas, dapat diketahui bahwa frekuensi masih dalam standar operasi sistem.



Gambar 4.29. Tegangan sistem setelah penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat dan OFGS

Dilihat dari grafik nilai tegangan operasi bus, tidak terdapat bus yang mengalami undervoltage. Pada beberapa bus memiliki nilai yang sama dengan mitigasi sebelumnya. Bus yang memiliki tegangan yang relative tinggi antara lain Cilacap, Adipala, Kesugihan, dan Tanjung Jati. Ketiganya memiliki tegangan pada range 1.03 – 1.04 pu. Dari persebaran nilai tegangan tersebut, tidak terdapat bus yang memiliki tegangan melebihi batas standar.

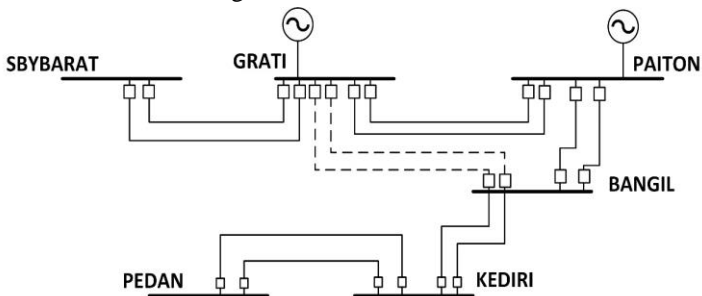
Dari mitigasi ini dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan menambah saluran dari Paiton ke Surabaya Barat dapat menghilangkan fenomena *power swing* akibat kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati. Namun frekuensi sistem melebihi batas standar operasi, sehingga perlu

dilakukan pelepasan generator. Dari hasil simulasi, mitigasi dengan pelepasan generator dapat menurunkan frekuensi dan frekuensi stabil pada range standar operasi yang berlaku.

4.3.4 Penambahan Saluran Bangil – Grati dan OFGS (*Over Frequency Generator Shedding*)

Sebagaimana diuraikan sebelumnya, dengan penambahan saluran transmisi dapat meningkatkan stabilitas suatu sistem, dalam hal ini adalah sistem Paiton. Pada subbab ini akan diujicobakan jenis mitigasi lain dengan metode penambahan saluran, yaitu penambahan saluran dari GITET Bangil ke Grati.

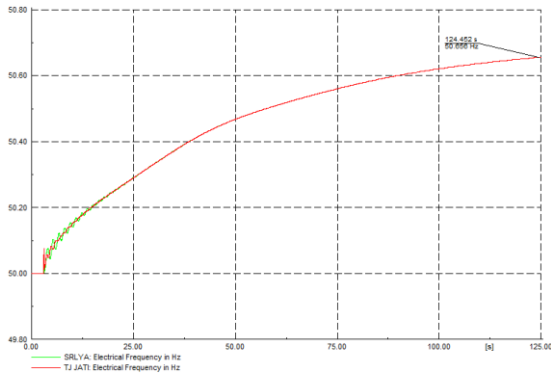
Menurut Buku RUPTL 2018-2027 [17], GI Bangil akan mencapai waktu COD (*Commercial Operation Date*) pada tahun 2019. GI Bangil ini merupakan GI *incomer double phi* terhadap saluran Paiton - Kediri. Hal ini berarti GI Bangil akan berada diantara GI Paiton dan Kediri. Selanjutnya, diujicobakan dengan penambahan SUTET Bangil – Grati. Pada simulasi ini, dalam penentuan jarak antar GI menggunakan estimasi jarak dari hasil pengukuran pada Google Maps. Sehingga didapatkan jarak Paiton – Bangil sejauh 100 km , Bangil – Kediri sejauh 109,1 km, dan Bangil – Grati sejauh 43 km. Saluran tambahan dari Bangil ke Grati menggunakan jenis konduktor ACSR-GANNET 4X392.8mm *double circuit* (86 kms). Berikut ini adalah gambar topologi setelah penambahan saluran Bangil – Grati.



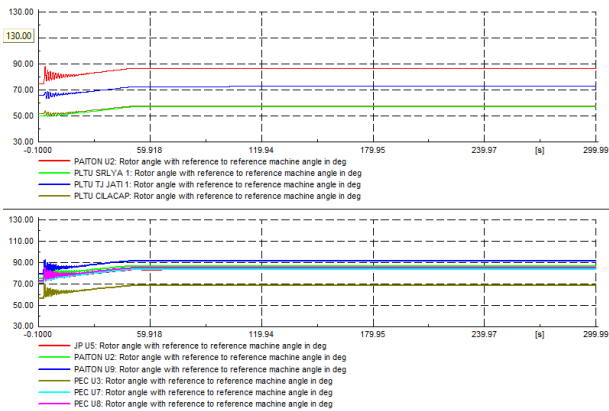
Gambar 4.30. Topologi jaringan dengan penambahan saluran Bangil - Grati

Mitigasi ini dibagi menjadi dua tahap. Tahap pertama adalah menggunakan skema penambahan saluran Bangil – Grati, sedangkan tahap dua adalah menggunakan skema penambahan saluran Bangil – Grati dengan OFGS (Over Frequency Generator Shedding). Dengan skema mitigasi ini diharapkan setelah saluran Paiton – Grati lepas, aliran dayanya dapat dialirkan melalui saluran Paiton – Bangil – Grati.

Berikut ini adalah respon sistem dengan menggunakan skema mitigasi tahap pertama, yaitu penambahan saluran Bangil – Grati.

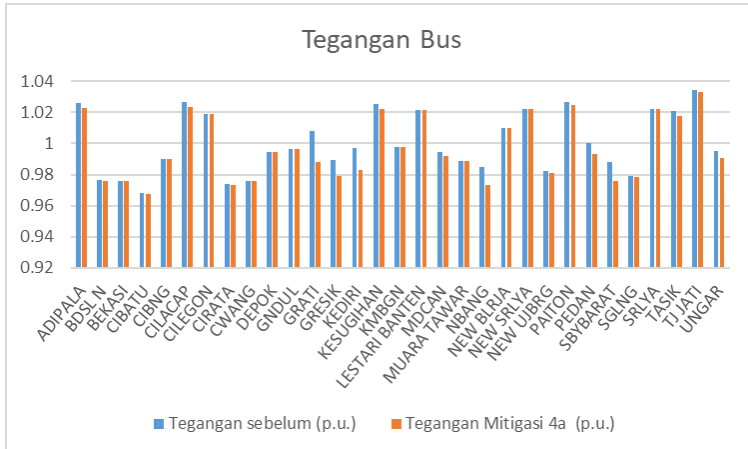


Gambar 4.31. Respon frekuensi sistem setelah penambahan saluran Bangil – Grati



Gambar 4.32. Respon sudut rotor kit Paiton dan pembangkit – pembangkit besar

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa frekuensi terus naik dari detik ke 3,1 sampai detik ke 125. Pada detik ke 125 frekuensi menyentuh angka 50,656 Hz. Jika dilihat dari sisi respon sudut rotor, tidak ada generator yang sudut rotornya melebihi batas kestabilan. Semua generator besar masih tetap bisa menjaga sinkronisasi dengan sistem sehingga tidak ada generator yang mengalami *out-of-step*.



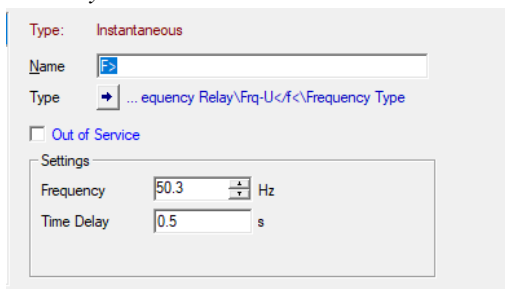
Gambar 4.33. Grafik tegangan sebelum dan sesudah mitigasi

Selain dari sisi sudut rotor, tidak permasalahan dari sisi tegangan, dimana tidak ada bus yang mengalami under voltage. Nilai tegangan ini diambil setelah sistem mencapai titik *steady state* baru. Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa terdapat penurunan tegangan bus setelah terjadi kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati. Namun penurunan ini masih dalam batas standar tegangan.

Dari uraian diatas, dapat disimpulkan bahwa respon sistem hampir sama dengan mitigasi sebelumnya (subbab 4.3.3), dimana parameter sudut rotor dan tegangan tidak terdapat permasalahan, namun frekuensi sistem cenderung naik dan melebihi batas standar operasi. Oleh Karena itu, perlu dilakukan mitigasi lanjutan yaitu mitigasi tahap dua.

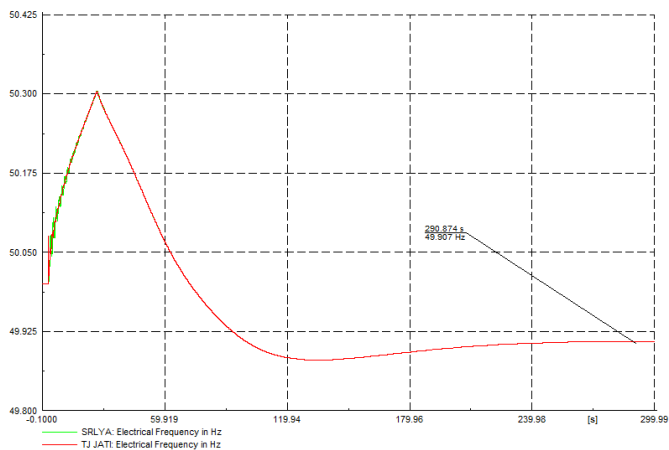
Sebagaimana disebutkan sebelumnya, skema mitigasi tahap dua ini akan mengkombinasikan penambahan saluran Bangil – Grati dan

penerapan OFGS. Pada mitigasi ini, setting OFGS berada pada nilai 50,3 Hz dengan *time delay* 0.5 detik.



Gambar 4.34. Setting relay OFGS

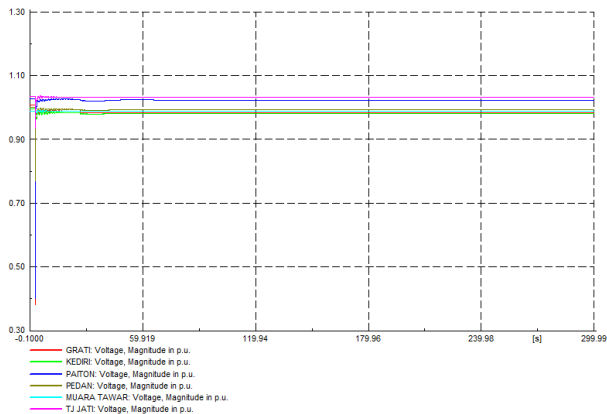
Kebutuhan daya generator yang harus dilepas pada skema mitigasi ini adalah ± 93 MW, dan target OFGS-nya adalah generator Grati ST 1.0. Dari hasil skema mitigasi ini, didapatkan respon sistem sebagai berikut.



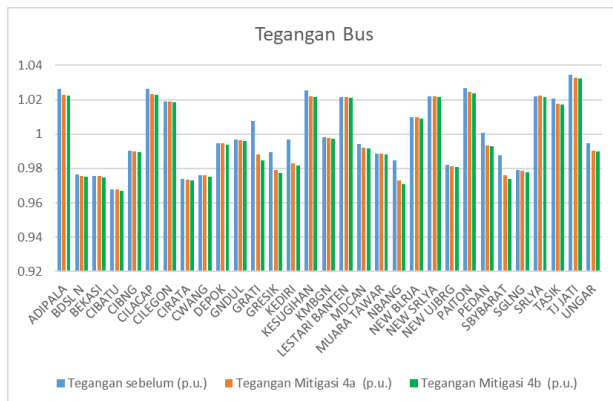
Gambar 4.35. Respon frekuensi sistem setelah penambahan Bangil – Grati dan OFGS

Gambar diatas menunjukkan frekuensi sistem ketika diujicobakan skema mitigasi penambahan saluran dan OFGS. Frekuensi pada detik – detik awal simulasi naik secara kontinyu. Saat frekuensi

sistem menyentuh 50,3 Hz, relay OFGS bekerja dan generator Grati ST 1.0 trip. Pada kondisi ini telah berhasil mengurangi pembangkitan sistem sebesar 93 MW. Selanjutnya frekuensi turun secara kontinyu hingga mencapai titik terendah, yaitu 49,889 Hz. Kemudian frekuensi mengalami kenaikan dan mencapai titik *steady state* baru pada nilai 49,907 Hz. Dilihat dari sisi frekuensi, skema mitigasi ini dapat menjaga kestabilan frekuensi dan menjaga nilai frekuensi pada range standar operasi.

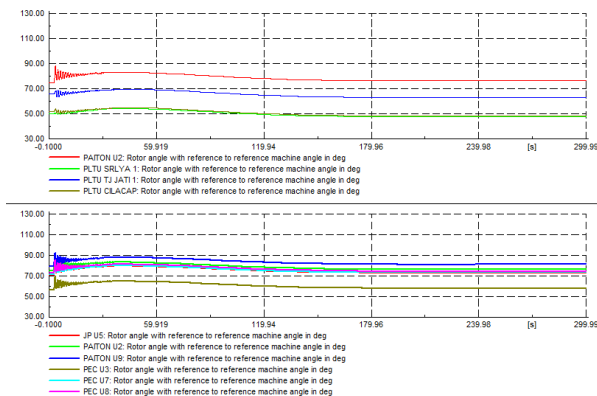


Gambar 4.36. Respon tegangan bus setelah penambahan saluran Bangli – Grati dan OFGS

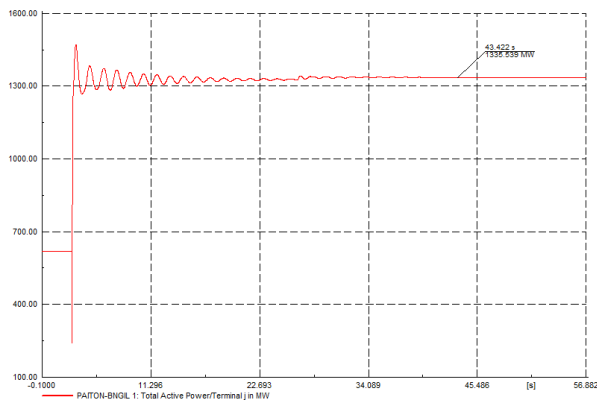


Gambar 4.37. Grafik perbandingan tegangan antara kondisi sebelum gangguan, mitigasi 4a, dan mitigasi 4b

Dilihat dari sisi tegangan, setelah mencapai kondisi *steady state* yang baru, tidak ada permasalahan undervoltage pada bus. Tidak terdapat bus yang magnitude tegangannya kurang dari 0,95 pu. Jika dibandingkan dengan kondisi sebelum terjadi gangguan, bus yang mengalami penurunan tegangan yang cukup drastis adalah bus Grati, Gresik, Kediri, dan Surabaya Barat. Jika dibandingkan dengan hasil mitigasi 4a (penambahan saluran Bangil – Grati), nilai tegangan pada mitigasi ini cenderung lebih rendah. Namun, masih dalam range standar operasi.



Gambar 4.38. Respon sudut rotor kit Paiton dan pembangkit – pembangkit besar



Gambar 4.39. Aliran daya saluran Paiton – Bangil

Gambar 4.37 dan 4.38 merupakan grafik respon sudut rotor dan aliran daya pada saluran Paiton – Bangil. Dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa seluruh generator, terutama kit Paiton tetap dapat menjaga sinkronisasi dan stabilitasnya, sehingga tidak terdapat generator yang *out-of-step* dan daya tetap dapat dibangkitkan. Daya yang dibangkitkan kit Paiton di transfer melalui saluran Paiton – Bangil. Akibatnya, terjadi lonjakan aliran daya pada saluran Paiton – Bangil dari yang semula 618 MW menjadi 1331,9 MW untuk tiap salurannya. Meskipun terjadi lonjakan aliran daya, saluran Paiton – Bangil tidak mengalami overload (>80%) dimana pembebanannya hanya mencapai 63,9% dari kapasitas thermalnya.

Dari mitigasi ini dapat ditarik kesimpulan bahwa dengan penambahan saluran Bangil – Grati dan pengimplementasian OFGS pada saat terjadi kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati dapat menghilangkan fenomena *power swing*, mal-trip pada relay jarak, dan *out-of-step* pada generator. Selain itu, dengan penerapan mitigasi ini, frekuensi sistem tetap dapat dijaga pada range standar operasi yang berlaku.

4.3.5 Rangkuman Hasil Mitigasi

Dari skema mitigasi yang diujicobakan, untuk setiap skema mitigasi memiliki respon yang berbeda – beda. Berikut ini adalah rangkuman untuk setiap skema mitigasi yang dilampirkan dalam bentuk tabel.

Tabel 4.8. Rangkuman hasil mitigasi

No	Nama Mitigasi	Gen Trip [MW]	Reaktor Trip [MVAR]	Frekuensi [Hz]			Ket
				Max	Min	Steady	
1	Pemasangan TCSC di saluran Paiton - Kediri	0	0	n/a	50,8	n/a	Sistem tidak stabil, Frekuensi naik secara kontinyu
2	Pemasangan TCSC di saluran Paiton - Kediri dan Intertrip Reaktor	0	788	49,91	50,154	49,924	Sistem stabil

No	Nama Mitigasi	Gen Trip [MW]	Reaktor Trip [MVAR]	Frekuensi [Hz]			Ket
				Max	Min	Steady	
3a	Penambahan saluran Paiton - Surabaya barat	0	0	n/a	50,4	n/a	Sistem tidak stabil, Frekuensi naik secara kontinyu
3b	Penambahan saluran Paiton - Surabaya barat dan OFGS	78	0	49,923	50,2	49,942	Sistem stabil, Target OFGS adalah Gresik ST 2.0
4a	Penambahan saluran Bangil - Grati	0	0	n/a	50,656	n/a	Sistem tidak stabil, Frekuensi naik secara kontinyu
4b	Penambahan saluran Bangil - Grati dan OFGS	93	0	49,889	50,3	49,907	Sistem stabil, Target OFGS adalah Grati ST 1.0

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Pemasangan TCSC pada saluran Paiton – Kediri dapat mengatasi dampak *power swing* akibat kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati dilihat dengan tidak adanya kejadian mal-trip relay jarak dan tidak adanya generator *out-of-step*, namun frekuensi sistem tidak stabil, dimana frekuensi naik hingga 50.8 Hz pada detik ke 10.
2. Pemasangan TCSC pada saluran Paiton – Kediri dan disertai skema intertrip reaktor sebesar 788 MVAR dapat mengatasi dampak *power swing* dan dapat menstabilkan frekuensi sistem pada nilai 49,924 Hz.
3. Penambahan saluran dari Paiton ke Surabaya Barat dapat mengatasi dampak *power swing* akibat kontingensi N-1-1 saluran Paiton – Grati namun terjadi *over frequency* pada sistem.
4. Penambahan saluran Paiton – Surabaya Barat disertai skema OFGS (Over Frequency Generator Shedding) sebesar 78 MW dapat mengatasi frekuensi sistem yang berlebih dan menstabilkan frekuensi pada nilai 49,942 Hz.
5. Skema penambahan saluran dari Bangil – Grati dapat mengatasi fenomena *power swing*, namun frekuensi sistem tidak stabil dan cenderung naik. Namun jika skema ini disertai pelepasan generator sebesar 93 MW, frekuensi sistem dapat stabil pada nilai 49,907 Hz

5.2 Saran

Adapun saran dari penulis untuk pengembangan dan penelitian selanjutnya antara lain :

1. Mitigasi fenomena *power swing* ini dapat dikembangkan lagi dengan mempertimbangkan sub-sistem 150 Kv, baik berupa beban, saluran, maupun pembangkit.

2. Mitigasi fenomena *power swing* ini dapat dikembangkan lagi dengan memperhatikan pengembangan sistem tahun berikutnya.
3. Mitigasi fenomena *power swing* dapat dilakukan di bagian lain dari sistem Jawa Bali yang memungkinkan terjadinya *power swing*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. Vivian, *Analysis of Distance Protection*. Exeter: Short Run Press Ltd., 1985.
- [2] H. Saadat, *Power System Analysis*. New York: WCB McGraw-Hill, 1999.
- [3] A. Soeprijanto, *Desain Controller untuk Kestabilan Dinamik Sistem Tenaga Listrik*. Surabaya: ITS Press, 2012.
- [4] I. Dobson, T. Van Cutsem, C. L. DeMarco, M. Venkatasubramanian, T. Overbye, and C. A. Canizares, *Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools*. IEEE Power Engineering Society, 2002.
- [5] B. K. Kumar, *Power System Stability and Control*. Chennai: Indian Institute of Technology Madras, 2014.
- [6] DIgSILENT GmbH, *DIgSILENT Power Factory User Manual*. Gomaringen, 2014.
- [7] U. N. Khan and L. Yan, "Power Swing Phenomena and its Detection and Prevention," p. 4.
- [8] P. B. Panchal and B. B. Mehta, "ENHANCEMENT OF REACTIVE POWER CAPABILITY OF DOUBLY FED INDUCTION GENERATOR," p. 13, 2014.
- [9] H. T. Hassan, U. F. Malik, I. A. Khan, and T. Khalid, "Stability Improvement of Power System Using Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)," *International Journal of Engineering*, vol. 13, no. 02, p. 5, 2013.
- [10] X.-P. Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*. Germany: Springer, 2006.
- [11] F. Milano, *Power System Analysis Toolbox Documentation for PSAT version 2.0.0*. 2008.
- [12] F. M. Gonzalez-Longatt and J. Luis Rueda, Eds., *PowerFactory applications for power system analysis*. Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer, 2014.
- [13] Departemen Sumber Daya Mineral, *ATURAN JARINGAN SISTEM TENAGA LISTRIK JAWA-MADURA-BALI*. Jakarta: Departemen Sumber Daya Mineral, 2007.
- [14] DIgSILENT GmbH, "Dynamic Modelling Tutorial," in *DIgSILENT PowerFactory Application Guide*, Germany: DIgSILENT GmbH, 2013.

- [15] R. Sadikovic, G. Andersson, and P. Korba, "Damping Controller Design for Power System Oscillations," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 12, no. 1, pp. 51–62, Jan. 2006.
- [16] P. P. Kulkarni and N. D. Ghawghawe, "Optimal placement and parameter setting of TCSC in power transmission system to increase the power transfer capability," in *2015 International Conference on Energy Systems and Applications*, Pune, India, 2015, pp. 735–739.
- [17] Kementrian Energi dan Sumbar Daya Mineral Republik Indonesia, *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Tahun 2018 - 2027*. Jakarta: Kementrian Energi dan Sumbar Daya Mineral Republik Indonesia, 2018.
- [18] X.-F. Wang, Y. Song, and M. Irving, *Modern Power Systems Analysis*. Boston, MA: Springer US, 2008.
- [19] E. D. Agüero, J. C. Cepeda, and D. G. Colomé, "FACTS models for stability studies in DlgSILENT Power Factory," p. 6.
- [20] F. M. Albatsh, S. Mekhilef, S. Ahmad, H. Mokhlis, and M. A. Hassan, "Enhancing power transfer capability through flexible AC transmission system devices: a review," *Frontiers Inf Technol Electronic Eng*, vol. 16, no. 8, pp. 658–678, Aug. 2015.
- [21] W. Aslam, Y. Xu, A. Siddique, and F. M. Albatsh, "Implementation of series facts devices SSSC and TCSC to improve power system stability," in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Wuhan, 2018, pp. 2291–2297.

LAMPIRAN

BIOGRAFI



Penulis bernama Restu Maulana Azmi. Lahir tanggal 4 Mei 1997 di kabupaten kecil di tepi selatan Jawa Tengah, yaitu Kabupaten Kebumen. Penulis mengawali pendidikan di SD N Sidorejo, kemudian melanjutkan di SMP N 1 Kebumen dan kemudian di SMA N 1 Kebumen. Pada tahun 2015 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Elektro ITS Surabaya dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Pada awal tahun 2017 penulis menjadi asisten di Laboratotium Simulasi Sistem Tenaga Listrik atau biasa disebut PSSSL. Semasa menjadi asisten lab, penulis terlibat dalam beberapa kegiatan seperti pengabdian masyarakat, penelitian, project kerjasama dengan PLN, dsb. Selain itu, penulis juga aktif di kegiatan manajerial, salah satunya di organisasi HIMATEKTRO. Penulis dapat dihubungi melalui email : restu97@gmail.com