



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**Studi Analisa Stabilitas Transien Sistem Jawa-Madura-Bali
(Jamali) 500kV Setelah Masuknya Pembangkit Paiton 1000
MW Pada Tahun 2021**

Prima Prahasta Rezky
NRP 2214105077

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

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2016



FINAL PROJECT - TE 141599

Study of Transient Stability Analysis System Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV After the Entry of 1,000 MW Paiton Power Plant in 2021

Prima Prahasta Rezky
NRP 2214105077

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

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**STUDI ANALISA STABILITAS TRANSIEN SISTEM
JAWA-MADURA-BALI (JAMALI) 500KV SETELAH
MASUKNYA PEMBANGKIT PAITON 1000 MW
PADA TAHUN 2021**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

Pada

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

Ir. Ni Ketut Arvani, MT.
NIP. 196509011991032002



**Studi Analisa Stabilitas Transien Sistem Jawa-Madura-Bali
(Jamali) 500kV Setelah Masuknya Pembangkit Paiton 1000 MW
Pada Tahun 2021**

Nama : Prima Prahasta Rezky
NRP : 2214105077
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ABSTRAK

Dengan kebutuhan akan listrik yang setiap tahunnya meningkat khususnya di pulau jawa dan sekitarnya, pemerintah melalui PLN merencanakan pengembangan kapasitas dan energi listrik guna mengatasi meningkatnya kebutuhan tersebut. Sehingga pada tahun 2021 sistem kelistrikan di Jawa-Bali menambahkan satu unit pembangkit Paiton 1000 MW. Dengan adanya pembangkit baru tersebut maka diperlukan rekonfigurasi jaringan dan perlu dilakukan analisis ulang terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa untuk kasus lepasnya generator, lepasnya satu saluran dan saluran dobel sirkit tidak menyebabkan sistem keluar sinkronisasi. Karena ketika generator lepas, daya *supply* yang hilang hanya 2% dari total pembangkitan dan lepasnya saluran dapat di *backup* oleh sistem interkoneksi. Begitu juga dengan kasus single pole auto reclosing dengan waktu CB kembali tertutup sebesar 500 ms setelah gangguan, hasil respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan menunjukkan sistem masih stabil. Kemudian untuk kasus waktu pemutusan kritis (CCT), nilai CCT pada sistem berada pada kisaran 300 ms – 400 ms. Sehingga dengan standart batas pemutusan CB untuk sistem transmisi adalah 120 ms – 140 ms maka dapat dikatakan sistem tetap stabil ketika terjadi hubung singkat tiga fasa ke tanah.

Kata Kunci : kestabilan transien, generator lepas, saluran lepas, *single pole auto reclosing*, *critical clearing time*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

**Study of Transient Stability Analysis
System Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV
After the Entry of 1,000 MW Paiton Power Plant in 2021**

Nama : Prima Prahasta Rezky
NRP : 2214105077
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ABSTRACT

With demand for electricity is increasing annually, especially in Java and surrounding areas, the government through PLN planning and capacity development of electrical energy in order to cope with the increasing need. So that in 2021 the electricity system in the Java-Bali add one unit of 1,000 MW Paiton power plant. With the new power plants will require reconfiguration of the network and should be analysis of performance of the overall system. From the simulation results show that for the case of loss of the generator, the loss of one circuit and double circuit does not cause the system out of synchronization. Because when the generator is off, the power supply is lost only 2% of the total generation and release of line can be backup by a system interconnect. So is the case of single pole auto reclosing the CB time of 500 ms closed again after the interruption, response results rotor angle, frequency and voltage indicates the system is still stable. Then for the case of critical disconnection time (CCT), the value of CCT on the system is in the range of 300 ms - 400 ms. So with a standard termination CB limit to the transmission system is 120 ms - 140 ms then we can say the system remains stable when the three-phase short circuit to ground.

Keywords : *transient stability, loss of generator, line trip, single pole auto reclosing, critical clearing time.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xv
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan dan Batasan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metode Penelitian	2
1.5 Sistematika Pembahasan	3
1.6 Relevansi.....	4
BAB 2 STABILITAS TRANSIEN	
2.1 Definisi Kestabilan	7
2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	7
2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor	8
2.2.2 Kestabilan Tegangan.....	14
2.2.3 Kestabilan Frekuensi	14
2.3 Kestabilan Transien	15
2.3.1 Kestabilan Transien Multimesin.....	17
2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	18
2.5 Hal-Hal yang Mempengaruhi Kestabilan.....	21
2.6.1 Gangguan Hubung Singkat	21
2.6.2 Starting Motor.....	22
2.6.3 Penambahan Beban Secara Tiba-Tiba.....	22
2.6 Metode Mempertahankan Stabilitas Sistem dari Gangguan	23
2.7 Macam Pemodelan pada Studi Kestabilan Transien	24
2.8.1 Pemodelan Generator Sinkron	24
2.8.2 Pemodelan Beban	24

2.8	Standar yang Berkaitan dengan Efek Transien	24
2.8.1	Standar <i>Undervoltage</i>	24
2.8.2	Standar <i>Voltage Sagging</i>	25
2.8.3	Standar Frekuensi.....	25
2.9	<i>Critical Clearing Time</i>	25

BAB 3 DATA DAN METODOLOGI

3.1	Sistem Kelistrikan JAMALI 500 kV 2021.....	27
3.2	Data Saluran Interkoneksi JAMALI 500 kV 2021.....	28
3.3	Kapasitas Pembangkitan JAMALI 500 kV 2021	30
3.4	Data Beban JAMALI 500 kV 2021	31
3.5	Data Kontrol Generator JAMALI 500 kV 2021	32
3.6	Metodologi Simulasi	33

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Studi Kasus Stabilitas Transien Sistem Kelistrikan Transmisi JAMALI 500 kV Tahun 2021.....	35
4.2	Simulasi Stabilitas Transien	38
4.2.1	Kasus 1 Paiton 10 off ($t = 2s$).....	38
4.2.2	Kasus 2 <i>Critical Fault Clearing Time</i> ($t = 2s$)	44
4.2.3	Kasus 3 <i>No-Fault Double-Circuit Tripping of Interconnection Line</i>	50
4.2.4	Kasus 4 <i>No-Fault One-Circuit Tripping of the Double Circuit Interconnection Line</i>	54
4.2.5	Kasus 5 <i>Single Pole Auto Reclosing</i>	58

BAB 5 PENUTUP

5.1.	Kesimpulan	65
5.2.	Saran	65

DAFTAR PUSTAKA	67
-----------------------------	----

LAMPIRAN (SINGLE LINE DIAGRAM)

BIODATA PENULIS

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 <i>Voltage Sagging</i> Menurut Standar SEMI F47.....	25
Tabel 3.1 Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali	28
Tabel 3.2 Data kapasitas pembangkit Jamali 2021	30
Tabel 3.3 Data kapasitas beban Jamali 2021.....	31
Tabel 3.4 Data pemodelan dinamis generator Jamali 2021.....	32
Tabel 4.1 Summary of Total Generation, Demand	35
Tabel 4.2 Studi Kasus Stabilitas Transien.....	36
Tabel 4.3 Data Short Circuit 3 fasa pada bus Jamali.....	45
Tabel 4.4 Data Short Circuit 1 fasa ke tanah pada bus Jamali	58

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	HALAMAN
Gambar 2.1	Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga 8
Gambar 2.2	Single Line Diagram Sistem Dua Mesin 10
Gambar 2.3	Diagram Impedansi Sistem Dua Mesin 10
Gambar 2.4	Diagram Phasor Sistem Dua Mesin 11
Gambar 2.5	Diagram Skema untuk Studi Kestabilan 12
Gambar 2.6	Kurva Sudut Daya Karakteristik Respon Generator pada Keadaan Gangguan 16
Gambar 2.7	Representasi Rotor Generator dengan Arah Rotasi dari Torsi Mekanik dan Torsi Elektrik 19
Gambar 2.8	Standar <i>Voltage Sagging</i> Menurut SEMI F47 26
Gambar 2.9	Batas Operasi Frekuensi Abnormal untuk Steam Turbin Generator 26
Gambar 3.1	Single Line Diagram Sistem interkoneksi 500 kV Jamali 2021 29
Gambar 3.2	Flow chart metodologi 35
Gambar 4.1	Respon Sudut Rotor 6 generator ketika Paiton 10 trip 39
Gambar 4.2	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Paiton ketika Paiton 10 trip 40
Gambar 4.3	Respon Tegangan bus Suralaya dan Paiton ketika Paiton 10 trip 41
Gambar 4.4	Respon Sudut Rotor 6 generator ketika Paiton 10 trip 42
Gambar 4.5	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Paiton ketika Paiton 10 trip 43
Gambar 4.6	Respon Tegangan bus Suralaya dan Paiton ketika Paiton 10 trip 44
Gambar 4.7	Respon Sudut Rotor 7 generator ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms 46
Gambar 4.8	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Depok ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms 46

Gambar 4.9	Respon Sudut Rotor 8 generator ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms.....	47
Gambar 4.10	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Gandul ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms.....	48
Gambar 4.11	Respon Sudut Rotor 7 generator ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms.....	49
Gambar 4.12	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms.....	50
Gambar 4.13	Respon Sudut Rotor ketika saluran Suralaya-Cilegon trip.....	51
Gambar 4.14	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Cilegon ketika saluran Suralaya-Cilegon trip.....	52
Gambar 4.15	Respon Sudut Rotor generator ketika saluran antara Suralaya-Cilegon trip.....	53
Gambar 4.16	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Cilegon ketika saluran Suralaya-Cilegon trip.....	53
Gambar 4.17	Respon Sudut Rotor generator ketika satu saluran Suralaya-Cilegon trip.....	55
Gambar 4.18	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Cilegon ketika satu saluran Suralaya-Cilegon trip.....	55
Gambar 4.19	Respon Sudut Rotor generator ketika satu saluran Suralaya-Cilegon trip.....	56
Gambar 4.20	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Cilegon ketika satu saluran Suralaya-Cilegon trip.....	57
Gambar 4.21	Respon Sudut Rotor 6 generator ketika hubung singkat satu fasa ke tanah.....	59
Gambar 4.22	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat satu fasa ke tanah.....	59
Gambar 4.23	Respon Tegangan bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat satu fasa ke tanah.....	60
Gambar 4.24	Respon Sudut Rotor 6 generator ketika hubung singkat satu fasa ke tanah.....	61
Gambar 4.25	Respon Frekuensi bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat satu fasa ke tanah.....	62
Gambar 4.26	Respon Tegangan bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat satu fasa ke tanah.....	62

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam keadaan operasi yang normal atau stabil dari suatu sistem tenaga listrik, terdapat keseimbangan antara daya input mekanis pada prime mover dengan daya output listrik (beban listrik) pada sistem. Artinya semua generator berputar dalam keadaan sinkron. Daya output listrik ini sangat dipengaruhi oleh fluktuasi beban dimana ketika terjadi kenaikan atau penurunan beban maka harus diikuti oleh perubahan daya mekanik yang dihasilkan oleh prime mover. Apabila prime mover tidak mampu menyesuaikan dengan kondisi beban, maka akan mengakibatkan kondisi sistem menjadi tidak stabil.

Stabilitas transien berhubungan dengan gangguan besar secara tiba-tiba seperti gangguan hubung singkat, kabel transmisi trip, serta pelepasan beban/generator secara tiba-tiba. Apabila terjadi gangguan tersebut dan gangguan tidak segera dihilangkan, maka percepatan atau perlambatan putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem. Sebagai contoh adalah generator trip. Ketika terjadi generator trip, maka sudut rotor yang dibentuk oleh generator akan berubah menuju sudut rotor baru. Apabila setelah masa transien sudut rotor bisa mencapai kondisi kestabilan baru maka sistem dikatakan stabil. Sedangkan apabila setelah masa transien rotor tetap berosilasi dan tidak mencapai sudut kestabilan baru maka sistem dikatakan tidak stabil.

Penambahan pembangkit pada sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) sebesar 1000 MW Paiton merupakan pengembangan untuk menanggulangi permintaan beban yang semakin meningkat. Permintaan listrik yang terus meningkat memaksa sistem untuk beroperasi lebih dekat ke batas stabilitas. Mengingat dengan masuknya 1 unit pembangkit Paiton 1000 MW belum dilakukan studi tentang stabilitas transien, sehingga perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk mengetahui keandalan sistem saat terjadi gangguan transien. Analisis tersebut dipandang perlu untuk mengkaji ulang sistem pengaman yang ada yaitu dengan melakukan analisis transien sistem kelistrikan Jamali tahun 2021.

1.2 Permasalahan dan Batasan Masalah

Dalam Tugas Akhir ini akan dibahas mengenai studi stabilitas transien, diantaranya adalah :

- 1) Bagaimana analisa kestabilan transien di sistem Jawa-Bali dengan penambahan unit baru Paiton 1000 MW di tahun 2021 yang dilakukan dengan memperhatikan respon sudut rotor generator, respon frekuensi dan tegangan.
- 2) Gangguan akibat lepasnya salah satu pembangkit.
- 3) Gangguan akibat adanya hubung singkat terdapat dua macam gangguan yaitu gangguan satu fasa ke tanah dan tiga fasa ke tanah. Untuk gangguan tiga fasa ke tanah parameter yang diamati sudut rotor dan frekuensi.
- 4) Gangguan akibat adanya *line trip* parameter yang diamati sudut rotor dan frekuensi.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari Tugas Akhir ini adalah :

- 1) Melaksanakan studi kestabilan transien sistem kelistrikan sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV untuk mendapatkan rekomendasi yang diperlukan agar dapat menjaga keandalan serta kestabilan dari sistem sehingga mampu mengatasi setiap gangguan gangguan yang terjadi.
- 2) Mendapatkan rekomendasi suatu skema yang handal agar sistem kelistrikan sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV dapat kembali stabil ketika terjadi gangguan yang dapat menyebabkan sistem tidak stabil.

1.4 Metode Penelitian

Metode yang akan digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

- 1) Studi Literatur
Mengumpulkan buku dan referensi mengenai *Power Sistem Analysis* yang dilakukan mengenai analisis stabilitas transien (*transient stability*).
- 2) Pengumpulan Data

Pengumpulan data-data sistem kelistrikan dan single line diagram dari Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV yang meliputi : data generator dan unit pendukungnya (eksiter dan governor), data jaringan 500kV, data transformator, data beban dan skema operasi yang ada.

3) Pengolahan Data

Setelah semua data yang diperlukan untuk analisis transien didapatkan, maka dilakukan pemodelan sistem dalam bentuk single line diagram dan sekaligus memasukkan data yang diperoleh pada single line diagram agar dapat dilakukan analisis power flow dan transien.

4) Simulasi dan Analisis

Dalam tahap ini dilakukan simulasi dengan komputer menggunakan ETAP *Power Station 12.6* terhadap sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV tahun 2021, untuk mengetahui kestabilan transien akibat gangguan berupa generator lepas, hubung singkat dan *line trip*. Kemudian dianalisa respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan bus sistem.

5) Penarikan kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai kondisi kestabilan transient akibat gangguan yang ada di sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV tahun 2021.

1.5 Sistematika Pembahasan

Sistematika penulisan dalam Tugas Akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

BAB I : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, dan sistematika pembahasan

BAB II : Dasar Teori

Bab ini secara garis besar membahas stabilitas transient, konsep pelepasan beban beserta standarnya.

BAB III : Sistem Kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV.

Bab ini membahas sistem kelistrikan industri, spesifikasi beban dan pemodelan exciter, governor pada sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV dan software stabilitas transien ETAP 12.6.

BAB IV : Simulasi dan Analisa

Bab ini membahas tentang simulasi dan analisa stabilitas transien. Simulasi meliputi simulink dan ETAP 12.6. Selanjutnya dilakukan analisa data hasil stabilitas transient akibat gangguan lepasnya generator, hubung singkat dan *line trip*. Dari hasil simulasi stabilitas transien diperhatikan respon sudut rotor generator, respon frekuensi dan respon tegangan bus sebelum, saat dan setelah terjadi gangguan.

BAB V : Penutup

Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat dan dapat dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya tentang stabilitas transien pada sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV tahun 2021.

BAB 2

STABILITAS TRANSIEN

2.1 Definisi Kestabilan

Kemampuan dari suatu sistem tenaga dimana terdapat dua atau lebih mesin sinkron di dalamnya, untuk mempertahankan pengoperasian setelah terjadi perubahan pada sistem dapat diukur dari tingkat kestabilannya. Permasalahan utama adalah pada sistem yang beroperasi pada keadaan steady state saat mengalami gangguan sehingga mengalami ketidaksinkronan sudut tegangan. Dalam kondisi ini sistem tenaga listrik yang stabil, terdapat keseimbangan antara daya input mekanis pada prime mover dengan daya output listrik (beban listrik) pada sistem.

Dalam kondisi stabil, semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Jika sistem terkena gangguan, maka akan terjadi ketidakseimbangan antara daya input mekanis dan daya output listrik. Artinya terjadi perbedaan yang besar antara daya input mekanis dengan daya output listrik pada generator. Perbedaan antara daya mekanis dan daya listrik ini, dapat mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya. Apabila gangguan tidak segera dihilangkan, maka sistem akan keluar dari batas sinkron, akibat percepatan dan perlambatan putaran rotor generator.

2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Dalam buku prabha kundur, stabilitas sistem tenaga secara luas didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk tetap dalam kondisi operasi seimbang saat terjadi kondisi tidak normal dan dapat mengembalikan ke kondisi seimbang setelah terjadi gangguan [2].

Gangguan dalam sistem tenaga listrik yang mempengaruhi stabilitas ada 2 macam yaitu :

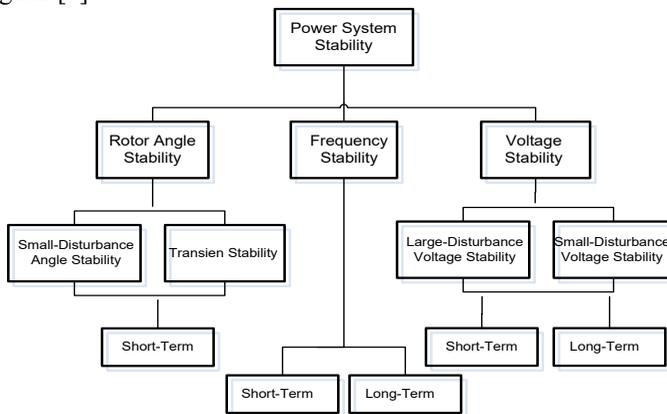
a. Gangguan kecil

Gangguan kecil yang terjadi berupa perubahan beban pada sisi beban atau pembangkit secara acak, pelan dan bertingkat. Jatuh (trip) yang dialami oleh jaring tenaga listrik dianggap sebagai gangguan kecil jika pengaruhnya terhadap aliran daya sebelum gangguan pada aliran itu tidak signifikan [8].

b. Gangguan besar

Gangguan ini bersifat mendadak, yakni gangguan yang menghasilkan kejutan tegangan tiba-tiba pada tegangan bus. Gangguan besar ini harus secepatnya dihilangkan, jika tidak dihilangkan secepatnya, gangguan tersebut sangat mempengaruhi kestabilan sistem. Tidak hanya gangguan, waktu gangguan juga berpengaruh terhadap kestabilan sistem [8].

Dalam paper IEEE *definition and classification of power system stability*, kestabilan sistem tenaga listrik secara umum dapat dibagi menjadi tiga macam kategori, yaitu: *Angle Stability*, *Frequency stability* dan *Voltage stability*. *Angle Stability* yaitu kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang saling terkoneksi pada suatu sistem tenaga listrik untuk tetap dalam keadaan sinkron. *Frequency stability* yaitu kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi *steady state* frekuensi akibat gangguan. Sedangkan *Voltage Stability*: yaitu kestabilan dari sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan nilai tegangan yang masih dapat diterima saat terjadi kontingensi atau gangguan [4].



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga [4]

2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor dapat diartikan sebagai kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang terhubung dalam suatu sistem tenaga

listrik untuk tetap dalam sinkronisasi. Masalah stabilitas ini melibatkan pembahasan tentang osilasi elektromekanis pada suatu sistem tenaga [2].

Untuk memudahkan dalam analisis dan menambah wawasan maka kestabilan sudut rotor dibagi menjadi 2 sub kategori yaitu :

- ✓ *Small-disturbance* (gangguan kecil) *rotor angle stability* [4]

Yaitu kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi terhadap gangguan kecil. *Small-disturbance* ini tergantung pada keadaan awal operasi sistem. Ketidakstabilan mungkin timbul karena 2 hal yaitu i) peningkatan sudut rotor pada mode non osilasi dan tidak periodic karena kurangnya torsi sinkronisasi. ii) Osilasi sudut rotor meningkat karena kurangnya torsi redaman yang cukup.

- ✓ *Large-disturbance* (gangguan besar) *rotor angle stability* [4]

Gangguan ini biasa disebut sebagai *transient stability*. Yaitu kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan yang parah. Seperti gangguan hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sistem yang dihasilkan besarnya sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh adanya hubungan sudut daya.

Kestabilan transien bergantung pada kondisi awal sistem operasi dan tingkat keparahan dari gangguan yang terjadi. Ketidakstabilan biasanya menghasilkan sudut baru karena torsi sinkronisasi tidak cukup. Sehingga mewujudkan ketidakstabilan ayunan pertama. Tapi dalam sistem tenaga listrik yang besar mungkin tidak selalu terjadi ketidakstabilan ayunan pertama, melainkan bisa menjadi hasil dari superposisi dari mode ayunan interarea yang lambat, sehingga menyebabkan ketidakstabilan melebihi ayunan pertama.

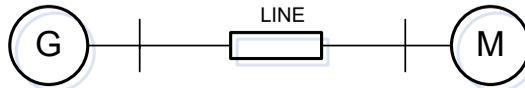
Perubahan torsi elektromekanik pada mesin sinkron yang mengalami gangguan dapat dibagi menjadi dua komponen :

- Komponen torsi sinkron, pada fasa dengan penyimpanan sudut rotor
- Komponen torsi peredam (*Damping torque*), pada fasa dengan penyimpanan kecepatan.

Kestabilan sistem tergantung pada kedua komponen torsi tersebut untuk masing-masing mesin sinkron. Kurangnya torsi sinkron akan menghasilkan ketidak stabilan tanpa osilasi, sebaliknya kekurangan torsi

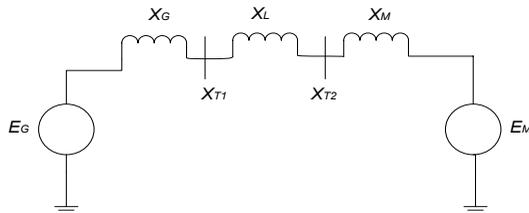
peredam akan menghasilkan ketidakstabilan yang disertai dengan osilasi [2].

Karakteristik yang paling penting dalam kestabilan tenaga listrik adalah karakteristik hubungan daya dengan posisi rotor pada mesin sinkron.



Gambar 2.2 Single Line Diagram Sistem Dua Mesin [2]

Pada Gambar 2.2. tersebut mengilustrasikan dua buah mesin sinkron dimana keduanya saling terhubung melalui sebuah saluran transmisi yang memiliki reaktansi. Reaktansi saluran transmisi yang diperhitungkan pada kasus ini hanyalah nilai reaktansi induktif X_L sedangkan untuk resistansi dan kapasitansi saluran diabaikan karena nilainya relative kecil. Generator sinkron yang mesuplai daya diwakili oleh mesin G sedangkan motor sinkron diwakili oleh mesin M . Single line pada Gambar 2.2. di atas dapat diubah menjadi diagram impedansi seperti Gambar 2.3. di bawah:



Gambar 2.3 Diagram Impedansi Sistem Dua Mesin [2]

dimana:

E_G = Tegangan internal generator.

E_M = Tegangan internal motor.

X_G = Reaktansi internal generator.

X_M = Reaktansi internal motor.

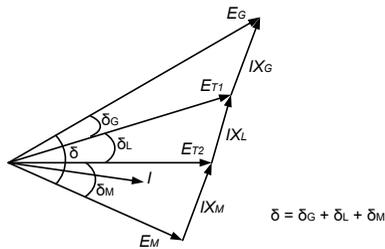
X_T = Reaktansi saluran.

Daya generator yang digunakan untuk mesuplai motor merupakan fungsi pembeda sudut δ antara rotor kedua mesin. Perbedaan sudut δ tersebut timbul akibat adanya ketiga komponen yaitu sudut internal generator, perbedaan sudut antara tegangan pada generator dan motor,

sudut internal motor.

Sudut internal generator δ_G adalah sudut dimana rotor generator yang mendahului medan putar pada stator. δ_L adalah sudut dimana tegangan generator mendahului tegangan motor. Sudut dimana rotor tertinggal oleh medan putar pada stator motor dinamakan sudut internal motor δ_M .

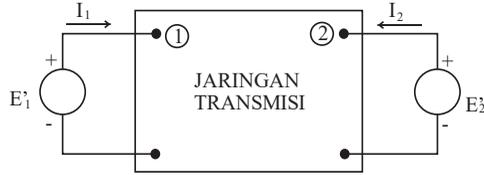
Dari ketiga komponen diatas, diagram fasor yang menunjukkan bagaimana bentuk hubungan antara tegangan internal motor E_M dan dengan tegangan internal generator E_G dapat dilihat pada gambar dibawah:



Gambar 2.4 Diagram Fasor Sistem Dua Mesin [2]

Dari Gambar 2.4 di atas dapat diperoleh suatu persamaan yang menyatakan hubungan daya generator yang ditransfer ke motor dalam fungsi sudut [2].

Untuk mempermudah mencari persamaan sudut daya, maka Gambar 2.3. akan dirubah menjadi sebuah skema sederhana yang biasa digunakan untuk studi kestabilan. Dimana tegangan peralihan generator dimisalkan sebagai E'_1 dan tegangan motor dimisalkan sebagai E'_2 . Sedangkan reaktansi generator, jaringan transmisi serta reaktansi motor dijadikan satu dan dimasukkan ke dalam sebuah kotak, sehingga tampak seperti Gambar 2.5 berikut :



Gambar 2.5 Diagram Skema untuk Studi Kestabilan [3]

Dari Gambar 2.5 diatas bisa didapatkan:

$$Y_{rel} = \begin{vmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{vmatrix} \quad (2.1)$$

Persamaan umum aliran daya adalah sebagai berikut berikut ini:

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (2.2)$$

Kemudian dengan membuat nilai k dan N berturut-turut sama dengan 1 dan 2, serta mengganti variabel V dengan E'_2 maka dapat memperoleh persamaan:

$$P_1 + Q_1 = E'_1 (Y_{11} E'_1)^* + E'_1 (Y_{12} E'_2)^* \quad (2.3)$$

Jika didefinisikan:

$$E'_1 = |E'_1| \angle \delta_1 \quad E'_2 = |E'_2| \angle \delta_2 \quad (2.4)$$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad Y_{12} = |Y_{12}| \angle \delta_{12} \quad (2.5)$$

Akan didapatkan:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{11}| \cos(\delta_1 - \delta_2 - \delta_{12}) \quad (2.6)$$

$$Q_1 = -|E'_1|^2 B_{11} + |E'_1| |E'_2| |Y_{11}| \sin(\delta_1 - \delta_2 - \delta_{12}) \quad (2.7)$$

Persamaan juga berlaku untuk rel 2 dengan saling menukarkan *subscript* pada kedua persamaan tersebut.

Jika kita misalkan :

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad (2.8)$$

dan menetapkan sudut baru γ sedemikian rupa sehingga

$$\gamma = \theta_{12} - \frac{\pi}{2} \quad (2.9)$$

jika dimasukkan pada persamaan 2.6, maka akan diperoleh:

$$P_1 = |E'_1|^2 G_{11} + |E'_1||E'_2||Y_{11}| \sin(\delta - \gamma) \quad (2.10)$$

Persamaan di atas dapat juga dituliskan dengan lebih sederhana sebagai

$$P_e = P_c + P_{max} \sin(\delta - \gamma) \quad (2.11)$$

Pada persamaan 2.11 di atas variabel P_e mewakili keluaran daya listrik dari generator (rugi jangkar diabaikan). Persamaan ini disebut dengan persamaan sudut-daya. Parameter P_c , P_{maks} , dan δ adalah konstanta untuk konfigurasi jaringan tertentu, besaran tegangan $|E'_1|$ dan $|E'_2|$ juga merupakan sebuah konstanta. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, jaringan dianggap tanpa resistansi dan semua unsur dari Yrel adalah suseptansi maka G_{11} dan γ keduanya bernilai nol. Sehingga persamaan sudut-daya yang didapatkan berlaku untuk jala-jala reaktansi murni adalah merupakan persamaan seperti yang sudah kita semua ketahui yaitu:

$$P_e = \frac{|E'_1||E'_2|}{X} \sin \delta \quad (2.12)$$

dimana:

$$X = X_G + X_L + X_M \quad (2.13)$$

dan X adalah reaktansi transfer antara E'_1 dan E'_2 atau sesuai dengan Gambar 2.3 [3].

2.2.2 Kestabilan Tegangan [4]

Kestabilan tegangan mengacu pada kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi *steady state* tegangan pada semua bus di sistem setelah mengalami gangguan dari kondisi operasi awal. Ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan keseimbangan antara permintaan beban dan suplai beban dari sistem tenaga listrik. Ketidakstabilan dapat mengakibatkan bentuk penurunan atau kenaikan tegangan pada beberapa bus.

Penurunan bertahap tegangan dibus dapat dikaitkan dengan kestabilan sudut rotor. Sebagai contoh hilangnya sinkronisasi dari mesin sebagai sudut rotor antara dua kelompok mesin dengan pendekatan 180° menyebabkan penurunan tegangan yang cepat pada daerah disekitar gangguan.

Akibat yang mungkin terjadi karena ketidakstabilan tegangan adalah kehilangan beban pada suatu area atau lepasnya jaringan transmisi karena bekerjanya relay proteksi. Faktor utama yang berkontribusi ketidak stabilan tegangan adalah ketika gangguan yang terjadi menyebabkan kebutuhan daya reaktif meningkat diluar dari kapasitas sumber daya reaktif yang tersedia.

Seperti halnya pada kestabilan sudut rotor, kestabilan tegangan diklasifikasikan menjadi beberapa subkategori seperti berikut :

- ✓ *Large disturbance voltage stability* adalah kemampuan dari sistem untuk menjaga tegangan *steady* setelah mengalami gangguan besar seperti hilangnya pembangkitan. Untuk menentukan kestabilan tegangan yang mengalami gangguan besar membutuhkan pengujian respon tidak linier dari sistem tenaga selama periode waktu yang cukup untuk melihat kinerja dan interaksi dari peralatan seperti motor, OLTC pada trafo dan pembatas arus medan pada generator. Periode studi biasanya ditambahkan beberapa detik hingga puluhan menit.
- ✓ *Small Disturbance voltage stability* adalah kemampuan sistem tenaga untuk menjaga tegangan steady ketika mengalami gangguan kecil seperti perubahan kenaikan pada beban. Konsep ini berguna dalam menentukan, bagaimana tegangan sistem akan merespon perubahan kecil pada sistem.

2.2.3 Kestabilan Frekuensi [4]

Kestabilan frekuensi mengacu kepada kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi *steady state* frekuensi

akibat gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan. Hal ini bergantung dari kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan akibat adanya hilangnya beban.. Umumnya, masalah kestabilan frekuensi dikaitkan ketidak mampuan dari respon peralatan, lemahnya kordinasi dari peralatan kontrol dan peralatan frekuensi atau kurangnya daya cadangan pembangkitan (*spining reserve*).

Selama penyimpangan frekuensi, besarnya tegangan bisa berubah dengan signifikan, terutama untuk kondisi *islanding* dengan *underfrekuensi load shedding*. Besarnya perubahan tegangan yang mungkin lebih tinggi dari perubahan frekuensi mempengaruhi ketidakseimbangan beban pembangkitan.

2.3 Kestabilan Transien

Adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi setelah megalami gangguan besar yang bersifat mendadak selama sekitar satu “swing” (yang pertama) dengan asumsi bahwa pengatur tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja [7].

Pada analisis kestabilan transien menggunakan pendekatan model nonlinear. Kestabilan transien merupakan fungsi dari kondisi operasi dan gangguan. Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas *transient* harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi.

Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi input dan output listrik pada sistem akan hilang. Jika energi input tidak lagi mencukupi, inersia rotor mesin yang masih bekerja, pada periode yang singkat akan melambat. Apabila beban hilang maka energi input pada sistem akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat.

Study kestabilan transien bertujuan untuk menentukan apakah sistem tadi akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadinya gangguan besar, misalnya adanya motor starting yang besar, perubahan beban yang mendadak, terputusnya unit pembangkit, atau pemutaran saklar (*switching*) saluran.

Masalah kestabilan transien menyangkut gangguan besar yang tidak lagi memungkinkan proses kelinieran, sehingga persamaan tidak linier differensial dan aljabar harus diselesaikan dengan metoda langsung atau dengan prosedur iterasi. Perkiraan yang biasa digunakan untuk transfer daya diberikan oleh:

$$P = \frac{V_t V_\infty}{x} \sin \delta \quad (2.14)$$

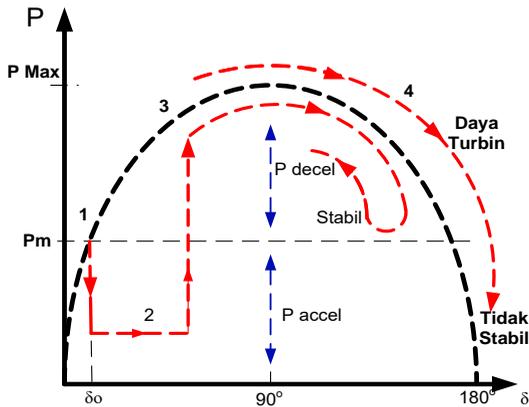
Dengan :

V_t : tegangan terminal mesin (volt)

V_∞ : tegangan *infinite* bus (volt)

P : Daya (watt)

δ : Sudut rotor (derajat)



Gambar 2.6 Kurva Sudut Daya Karakteristik Respon Generator pada Keadaan Gangguan [7]

Analisa stabilitas transien pada Gambar 2.6 memberikan ilustrasi karakteristik respon generator pada keadaan gangguan. Titik kerja awal (titik 1), sebelum terjadi gangguan. Dengan terjadinya gangguan menyebabkan daya output generator turun secara drastis. Selisih antara daya output listrik dengan daya input mekanis turbin mengakibatkan rotor generator mengalami percepatan, sehingga sudut rotor atau daya bertambah besar (titik 2). Pada saat gangguan hilang, daya output

generator pulih pada harga yang sesuai dengan kurva sudut daya ($P - \delta$) diatas (titik 3). Setelah gangguan hilang, daya output generator menjadi lebih besar daripada daya mekanis turbin. Hal ini mengakibatkan perlambatan pada rotor generator (titik 4).

Bila terdapat torsi lawan yang cukup setelah gangguan hilang untuk mengimbangi percepatan yang terjadi selama terjadinya gangguan, generator akan stabil setelah ayunan pertama dan akan kembali ke titik kerjanya dalam waktu kira-kira 0,5 detik. Bila torsi lawan tersebut tidak cukup besar maka sudut rotor atau daya akan terus bertambah besar sampai sinkronisasi dengan sistem menjadi hilang [7].

2.3.1 Kestabilan Transien Sistem Multimesin

Pada umumnya jika terjadi gangguan pada sistem tenaga listrik skala besar, hanya beberapa (atau bahkan satu) mesin saja yang paling terganggu atau terpengaruh oleh gangguan tersebut. Mesin yang paling terganggu bisa ditentukan dengan mengamati daya percepatan tiap mesin pada saat gangguan. Dengan mengamati batas kestabilan sistem yang paling terganggu, hal tersebut sudah cukup untuk menentukan kestabilan transien keseluruhan sistem. Mesin-mesin yang terganggu bisa memiliki batas kestabilan berbeda, tetapi mesin yang memiliki batas kestabilan terendah bisa dikatakan sebagai mesin yang paling kritis. Hal ini disebabkan karena pada saat terjadi gangguan mesin paling kritis akan kehilangan sinkronisasi pertama kali (karena memiliki batas kestabilan terendah) dan secara berurutan akan menyebabkan mesin yang lain akan mengalami kondisi yang sama sehingga membentuk suatu kelompok mesin yang tidak stabil dalam jumlah yang besar.

Jika dimisalkan mesin i adalah mesin kritis, seperti pada sistem single machine infinite bus (SIMB), batas kestabilan mesin kritis bisa diketahui dari variasi kecepatan dan daya percepatannya pada kondisi setelah gangguan (*postfault*). Lintasan *postfault* mesin ke i bisa dianggap stabil (*first-swing*) jika sudut mesin mencapai harga puncak (kecepatan nol) sementara daya percepatannya negatif.

$$\begin{aligned}\omega_i &= 0 \\ P_{ai} &< 0\end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, lintasan *postfault* mesin kritis bisa dianggap tidak stabil jika sudutnya terus naik ketika daya percepatannya menjadi nol atau berubah tanda :

$$\begin{aligned}\omega_i &> 0 \\ P_{ai} &= 0\end{aligned}$$

Lintasan kritis bisa ditentukan oleh kejadian dimana kecepatan dan daya percepatan sama dengan nol pada waktu yang bersamaan pada kondisi setelah terjadi gangguan.

$$\begin{aligned}\omega_i &= 0 \\ P_{ai} &= 0\end{aligned}$$

Batas kestabilan mesin kritis ini bisa diketahui dengan membandingkan area percepatan dengan area perlambatan.

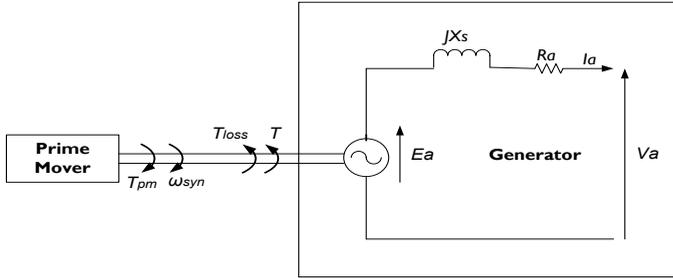
2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan [3]

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Dalam sistem unit-unit MKS dan untuk generator serempak, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.15)$$

Simbol-simbol pada persamaan 2.15 mempunyai arti sebagai berikut:

- J = Momen kelembaman total dari massa rotor dalam $kg \cdot m^2$
- θ_m = Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*), dalam radian mekanis
- t = Waktu, dalam detik
- T_a = Momen putar percepatan bersih, dalam Nm
- T_m = Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam Nm
- T_e = Momen putar listrik atau elektromagnetis bersih, dalam Nm



Gambar 2.7 Representasi Rotor Generator dengan Arah Rotasi dari Torsi Mekanik dan Torsi Elektrik.

Pada persamaan (2.15) karena θ_m diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut:

$$\theta_m = \omega_m t - \delta_m \quad (2.16)$$

dengan θ_m adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan diatas terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.17)$$

Dari persamaan (2.17) dan (2.15) maka didapatkan

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.18)$$

Jika persamaan 2.18 diatas dikalikan dengan ω_m maka :

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.19)$$

Dengan $J \omega_m$ adalah momen sudut (*angular momentum*) rotor yang dinyatakan dengan M. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah sebagai berikut

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (2.20)$$

Atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.21)$$

Bila ω_m tidak berubah sebelum stabilitas hilang maka M di evaluasi dengan kecepatan serempak sebagai berikut:

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.22)$$

Persamaan ayunan dalam hubungannya dengan moment sudut adalah:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.23)$$

Jika p adalah jumlah kutub generator sinkron maka sudut daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik δ_m adalah

$$\delta = \frac{P}{2} \delta_m$$

Maka persamaan ayunan dalam hubungannya dengan sudut daya listrik adalah

$$\frac{2}{P} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.24)$$

Bila persamaan 2.22 disubstitusikan ke persamaan 2.24 dan dibagi dengan daya dasar S_B . Akan menghasilkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2}{P} \chi \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \chi \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \quad (2.25)$$

Sekarang mendefinisikan suatu besaran yang dikenal sebagai konstanta H . Konstanta H didefinisikan sebagai energi kinetik (MJ) pada kecepatan sinkron dibagi dengan rating mesin (MVA) yang dapat dituliskan sebagai berikut.

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.26)$$

Substitusikan persamaan 2.26 kedalam persamaan 2.25 maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$\frac{2}{P} x \frac{2H}{\omega_{sm}} x \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.27)$$

Kecepatan listrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik

$\omega_{sm} = \frac{2}{P} \omega_0$ Sehingga persamaannya menjadi :

$$\frac{2H}{\omega_0} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.28)$$

δ adalah posisi angular dari rotor dalam electrical radian yang berhubungan dengan referensi putaran sinkron dan δ_0 adalah nilai pada saat $t = 0$,

$$\delta = \omega_r t - \omega_0 t + \delta_0 \quad (2.29)$$

Jika diturunkan terhadap waktu, didapatkan

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 = \Delta\omega_r \quad (2.31)$$

dan

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} \\ &= \omega_0 \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_0 \frac{d(\Delta\bar{\omega}_r)}{dt} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Jika komponen torsi redaman (*damping*) disertakan kedalam persamaan 2.28 maka persamaan ayunan tersebut menjadi seperti berikut :

$$\frac{2H}{\omega_0} x \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - K_D \Delta\bar{\omega}_r \quad (2.33)$$

2.5 Hal-Hal yang Mempengaruhi Kestabilan

2.5.1 Gangguan Hubung Singkat

Hubung singkat merupakan gangguan yang paling sering terjadi dalam sistem tenaga listrik. Gangguan hubung singkat dapat disebabkan oleh adanya sambaran petir, kegagalan isolasi ataupun

gangguan akibat ranting pohon dan binatang.

Gangguan hubung singkat menyebabkan timbulnya aliran arus dengan nilai yang besar menuju ke titik gangguan. Akibatnya tegangan di sekitar gangguan dapat menurun secara signifikan. Aliran arus yang besar tersebut merupakan jumlah dari arus kontribusi yang berasal dari generator serta motor induksi.

2.5.2 Starting Motor

Saat suatu motor di-*starting* maka motor tersebut akan menarik arus yang besarnya 5x atau 6x dari arus rating normalnya, hingga motor mencapai 80% atau 90% dari kecepatan sinkronnya. Hal ini dapat mengakibatkan terjadinya *voltage drop* atau penurunan tegangan di sistem, oleh sebab itu motor starting dianggap sebagai gangguan yang mempengaruhi kestabilan sistem.

Drop tegangan yang terjadi saat penyalaan motor induksi dapat mempengaruhi unjuk kerja dan umur dari peralatan tersebut. Apabila drop tegangan yang terjadi melewati batas atau standar yang ditentukan untuk suatu peralatan listrik dapat menyebabkan stabilitas tegangan sistem menjadi terganggu. Oleh karena itu perlu dilakukan suatu analisis proses *starting* motor.

2.5.3 Penambahan Beban Secara Tiba-tiba

Penambahan beban pada suatu sistem tenaga listrik dapat mengakibatkan timbulnya gangguan peralihan jika:

- ✓ Jumlah beban melebihi batas kestabilan keadaan mantap untuk kondisi tegangan dan reaktansi rangkaian tertentu
- ✓ Jika beban dinaikkan sampai terjadi osilasi, sehingga menyebabkan sistem mengalami ayunan yang melebihi titik kritis yang tidak dapat kembali.

Apabila sistem tenaga listrik dilakukan pembebanan dengan beban penuh secara tiba-tiba, maka arus yang diperlukan sangat besar akibatnya frekuensi sistem akan turun dengan cepat. Pada kondisi demikian sistem akan keluar dari keadaan sinkron walaupun besar beban belum mencapai batas kestabilan mantap yaitu daya maksimumnya, Hal ini dikarenakan daya keluar elektrik generator jauh melampaui daya masukan mekanis generator atau daya yang dihasilkan penggerak mula, dan kekurangan ini disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Sehingga putaran generator turun atau frekuensi sistem turun, sudut daya δ bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya

generator akan lepas sinkron atau tidak stabil. Sesaat dilakukannya pembebanan tersebut, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar [9].

2.6 Metode Mempertahankan Stabilitas Sistem dari Gangguan [10]

1. Menaikkan Konstanta Inersia Generator

Menaikkan konstanta inersia mesin akan mengurangi penambahan perubahan sudut δ dalam interval waktu tertentu, sehingga circuit breaker mempunyai waktu yang lebih lama untuk memutuskan rangkaian sebelum mesin melampaui sudut kritisnya. Semakin besar konstanta inersia mesin, maka semakin stabil suatu sistem. Tetapi dengan memperbesar konstanta inersia mesin, ukuran-ukuran mesin akan semakin besar pula, yang berarti memerlukan biaya yang besar sehingga tidak ekonomis dalam prakteknya.

2. Menaikkan Tegangan Generator

Apabila pada kondisi sebelum terjadi gangguan generator sedang mensuplai daya tertentu dengan sudut δ_0 , dengan menaikkan nilai tegangan generator yang terhubung dengan sistem, maka akan memperbesar daya yang disalurkan generator, yang berarti akan memperkecil sudut δ_0 . Dengan semakin kecilnya sudut δ_0 , apabila terjadi gangguan, generator dapat berayun lebih lama sebelum sudut kritiskestabilan tercapai. Dengan menaikkan nilai tegangan generator, berarti harus memperhitungkan isolasi untuk generator, yang berarti penambahan biaya untuk instalasi generator tersebut, sehingga cara ini relatif kurang ekonomis dalam prakteknya.

3. Menggunakan Peralatan Pemutus Rangkaian Yang Cepat (High Speed Recloser)

Semakin cepat gangguan yang terjadi pada sistem diisolir, maka stabilitas sistem semakin baik. Sesuai kriteria luas sama, sistem hanya akan stabil jika luasan daerah peredaman (A2) lebih besar atau sama dengan luas daerah percepatan (A1), dan yang menentukan besarnya masing-masing luasan ini adalah waktu pemutusan saluran yang mengalami gangguan. Semakin cepat waktu pemutusan, maka luasan daerah A1 akan semakin kecil, sehingga syarat suatu sistem untuk tetap stabil setelah mengalami gangguan akan terpenuhi.

4. Menurunkan Reaktansi Seri Saluran

Dengan menurunkan reaktansi seri saluran, dapat memperbesar daya yang disalurkan oleh generator, sehingga dapat meningkatkan stabilitas transien sistem.

2.7. Macam Pemodelan pada Studi Kestabilan Transien

2.7.1. Pemodelan Generator Sinkron

Pemodelan mesin sinkron yang paling sederhana untuk analisis kestabilan adalah dengan menggunakan model klasik, dimana dalam model klasik ini rotor kutub menonjol diabaikan dan mesin digambarkan sebagai tegangan konstan E' dengan reaktansi persen direct-axis-transient X'_d [5].

2.7.2. Pemodelan Beban

Terdapat tiga jenis model beban sederhana yang digunakan pada analisis kestabilan, ketiga model tersebut adalah:

1. Konstan impedansi.
2. Konstan kVA/konstan power.
3. Konstan arus.

Model konstan impedansi biasa digunakan untuk merepresentasikan beban statis dan model konstan arus biasa digunakan untuk merepresentasikan penyearah yang dapat dikontrol. Ciri impedansi konstan adalah beban-beban yang tidak menggunakan regulator. Misalkan lampu, kipas angin.

Model kVA/konstan power yaitu beban-beban yang berusaha mempertahankan daya apabila salah satu komponen V atau I nya turun. Jadi misalkan V turun maka I akan naik untuk mempertahankan supaya daya konstan. Untuk motor induksi yang berada jauh dari gangguan biasa menggunakan model konstan kVA. contohnya mesin-mesin listrik di industri kimia.

Model konstan arus yaitu beban-beban yang berusaha mempertahankan arus tetap konstan.

2.8.3 Standar yang Berkaitan dengan Efek Transien [8]

2.2.1 Standar *Undervoltage*

Undervoltage adalah penurunan nilai efektif dari tegangan yang nilainya kurang dari 90 persen dari tegangan nominal dan durasinya lebih lama dari satu menit. *Undervoltage* biasanya disebabkan oleh peristiwa gangguan. pembebanan yang berlebihan juga dapat

mengakibatkan *Undervoltage*. Tegangan sistem harus dipertahankan dengan batasan sebagai berikut :

Tegangan Nominal Kondisi Normal

500 kV +5%, -5%

150 kV +5%, -10%

70 kV +5%, -10%

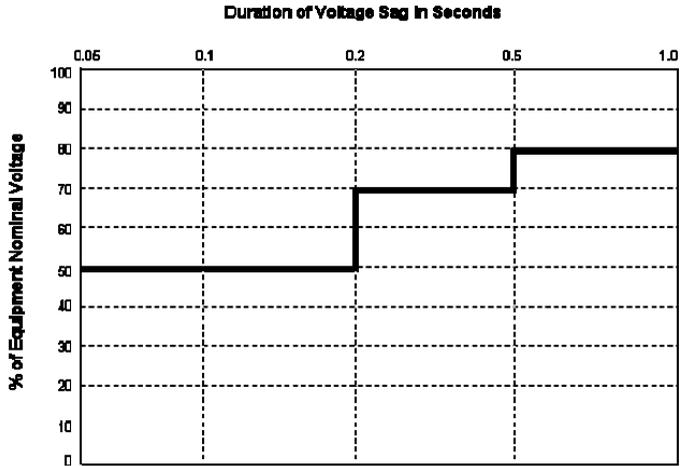
20 kV +5%, -10%

2.2.2 Standart Voltage Sagging

Salah satu efek dari transien, adalah penurunan tegangan dalam waktu yang singkat. Penurunan tegangan dalam waktu yang sekejap, dinamakan kedip tegangan (*Voltage Sagging*). Kedip Tegangan didefinisikan sebagai fenomena penurunan magnitude tegangan efektif terhadap harga nominalnya selama interval waktu (t). Biasanya disebabkan oleh sistem *fault*, energization beban besar ataupun *starting* dari motor-motor besar. Dalam Tugas Akhir ini standar *Voltage Sagging* yang digunakan adalah standar SEMIF47.

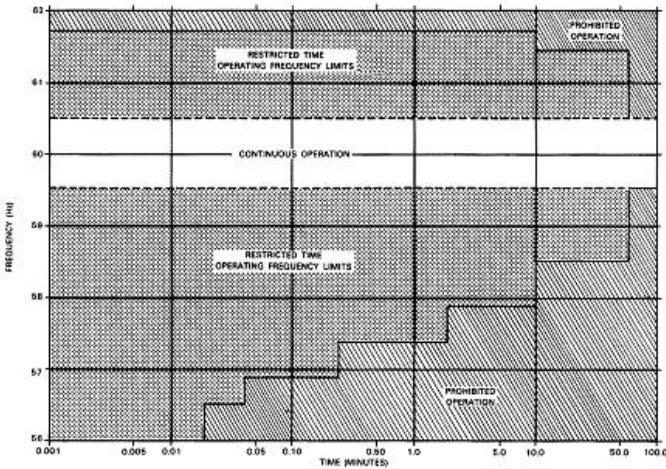
Tabel 2.1 *Voltage Sagging* Menurut Standar SEMI F47

VOLTAGE SAG DURATION			VOLTAGE SAG
Second (s)	Cycles at 60 Hz	Cycles at 50 Hz	Percent (%) of Equipment Nominal Voltage
< 0.05 s	< 3 cycles	< 2.5 cycles	Not specified
0.05 to 0.2 s	3 to 12 cycles	2.5 to 10 cycles	50 %
0.2 to 0.5 s	12 to 30 cycles	10 to 25 cycles	70 %
0.5 to 1.0 s	30 to 60 cycles	25 to 50 cycles	80 %
>1.0 s	> 60 cycles	> 50 cycles	Not specified



Gambar 2.8 Standar *Voltage Sagging* Menurut SEMI F47

2.8.3 Standar Frekuensi untuk *Steam Turbin Generator* (IEEE Std C37.106-2003) [6]



Gambar 2.9 Batas Operasi Frekuensi Abnormal untuk *Steam Turbin Generator* [6]

IEEE Std C37.106-2003 merupakan standar yang digunakan untuk proteksi frekuensi abnormal dari pembangkit dimana standar ini digunakan untuk sistem dengan frekuensi 60 Hz. Pada tugas akhir ini standar ini akan digunakan sebagai asumsi untuk standar frekuensi sistem 50 Hz sehingga perlu konversi standart dari frekuensi 60 Hz.

Gambar 2.6. menunjukkan batas operasi frekuensi abnormal untuk *steam turbin* dimana daerah antara 59.5 Hz dan 60.5 Hz merupakan batas untuk operasi kontinu dari generator turbin uap. Sedangkan untuk daerah yang diarsir adalah daerah terlarang frekuensi abnormal dalam batas waktu tertentu. Sebagai contoh, frekuensi *steam turbin generator* hanya boleh turun menjadi 59.5 Hz selama 10 detik.

2.9 *Critical Clearing Time (CCT)*

Critical clearing Time adalah waktu yang diijinkan untuk memutuskan gangguan agar generator tidak mengalami lepas sinkron. Apabila gangguan diputus kurang dari waktu kritis (*Critical Clearing Time*) yang telah ditentukan maka generator akan kembali stabil, namun apabila gangguan diputus melebihi dari waktu kritis (*Critical clearing Time*) yang telah ditentukan maka generator akan berada pada kondisi tidak stabil dan dapat lepas sinkron.

Halaman sengaja dikosongkan

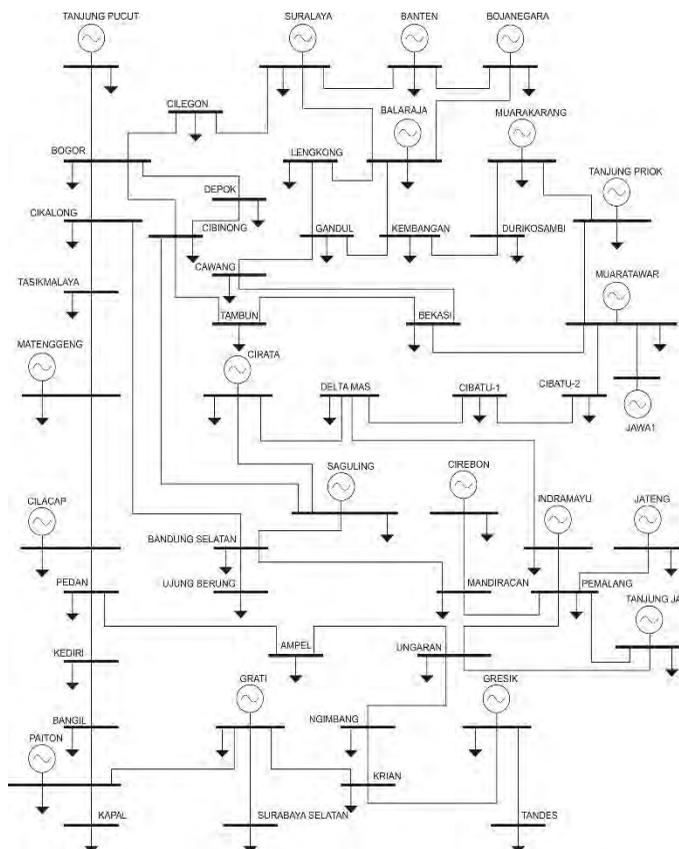
BAB 3

DATA DAN METODOLOGI

Sistem Kelistrikan Transmisi Jawa – Madura – Bali 500kV tahun 2021

3.1 Data Sistem Kelistrikan Jamali 500kV tahun 2021

Interkoneksi sistem kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV yang digunakan untuk analisa sistem stabilitas transien dapat digambarkan dengan single line di bawah.



Gambar 3.1 Sistem interkoneksi 500 kV Jamali

3.2 Data Saluran Sistem Interkoneksi Jamali 2021

Data saluran dan data bus yang digunakan sebagai masukan untuk proses simulasi, data impedansi ini merupakan nilai ohm per kilometernya seperti yang ditunjukkan tabel 3.1

Tabel 3.1. Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Jarak (km)
SURALAYA	CILEGON	0,01879	0,12549	9,17303	12,48
SURALAYA	BALARAJA	0,01879	0,12549	9,17303	62,759
BANTEN	BOJANEGARA	0,0243	0,12672	9,05531	10
BANTEN	SURALAYA	0,0243	0,12672	9,05531	10
BOJANEGARA	BALARAJA	0,01879	0,12549	9,17303	60
BALARAJA	KEMBANGAN	0,01879	0,12549	9,17303	80
LENGKONG	BALARAJA	0,01879	0,12549	9,17303	31
LENGKONG	GANDUL	0,01879	0,12549	9,17303	15
GANDUL	CAWANG	0,01879	0,12549	9,17303	40
GANDUL	DEPOK	0,01879	0,12549	9,17303	5,923
GANDUL	KEMBANGAN	0,01879	0,12549	9,17303	30,143
DURIKOSAMBI	KEMBANGAN	0,01879	0,12549	9,17303	6
M.KARANG	PRIOK	0,01879	0,12549	9,17303	20
M.KARANG	DURIKOSAMBI	0,01879	0,12549	9,17303	30
PRIOK	M.TAWAR	0,01879	0,12549	9,17303	30
BEKASI	TAMBUN	0,01879	0,12549	9,17303	2
BEKASI	M.TAWAR	0,01879	0,12549	9,17303	21
CAWANG	BEKASI	0,01879	0,12549	9,17303	16,84
T.PUCUT	BOGOR	0,01409	0,12145	9,91387	220
BOGOR	DEPOK	0,01879	0,12549	9,17303	6
BOGOR	CIKALONG	0,01879	0,12549	9,17303	154
BOGOR	CILEGON	0,01879	0,12549	9,17303	70,8
DEPOK	CIBINONG	0,0243	0,12672	9,05531	15,57
CIBINONG	SAGULING	0,01879	0,12549	9,17303	81,89
CIBINONG	TAMBUN	0,0243	0,12672	9,05531	2
CIBINONG	BOGOR	0,01879	0,12549	9,17303	60
CIKALONG	BANDUNG SEL	0,01879	0,12549	9,17303	8
CIKALONG	TASIK	0,01879	0,12549	9,17303	120

Lanjutan Tabel 3.1

Nama Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Jarak (km)
TASIK	MATENGGENG	0,01879	0,12549	9,17303	20
MATENGGENG	RAWALO	0,01879	0,12549	9,17303	80
RAWALO	PEDAN	0,01879	0,12549	9,17303	204
PEDAN	AMPEL	0,0243	0,12672	9,05531	40
PEDAN	KEDIRI	0,01879	0,12549	9,17303	205
KEDIRI	BANGIL	0,01879	0,12549	9,17303	108,1
BANGIL	PAITON	0,01879	0,12549	9,17303	101
JAWAI	M.TAWAR	0,01879	0,12549	9,17303	80
CIBATU B	CIBATU	0,01879	0,12549	9,17303	20
CIBATU B	M.TAWAR	0,0243	0,12672	9,05531	48,158
DELTAMAS	CIRATA	0,0243	0,12672	9,05531	40
DELTAMAS	CIBATU	0,01879	0,12549	9,17303	8
SAGULING	BANDUNG SEL	0,01879	0,12549	9,17303	39
SAGULING	CIRATA	0,0243	0,12672	9,05531	25,166
BANDUNG SEL	UNGARAN	0,01879	0,12549	9,17303	42
BANDUNG SEL	U.BERUNG	0,0243	0,12672	9,05531	50
U.BERUNG	MNDIRANCAN	0,0243	0,12672	9,05531	68
MNDIRANCAN	PEMALANG	0,01879	0,12549	9,17303	160
CIREBON	MNDIRANCAN	0,01879	0,12549	9,17303	20
JATENG	PEMALANG	0,01879	0,12549	9,17303	40
INDRAMAYU	PEMALANG	0,0243	0,12672	9,05531	256
INDRAMAYU	DELTAMAS	0,01879	0,12549	9,17303	103
PEMALANG	UNGARAN	0,01879	0,12549	9,17303	63
T.JATI	UNGARAN	0,01879	0,12549	9,17303	134,8
T.JATI	PEMALANG	0,01879	0,12549	9,17303	120
UNGARAN	NGIMBANG	0,01879	0,12549	9,17303	220
AMPEL	UNGARAN	0,01879	0,12549	9,17303	42
KRIAN	GRESIK	0,01879	0,12549	9,17303	23
KRIAN	GRATI	0,01879	0,12549	9,17303	92,4
KRIAN	NGIMBANG	0,0243	0,12672	9,05531	47,6
GRATI	SURABAYA SEL	0,01879	0,12549	9,17303	160

Lanjutan Tabel 3.1

Nama Bus	Nama Bus	R (pu)	X (pu)	B (pu)	Jarak (km)
GRATI	PAITON	0,01879	0,12549	9,17303	88,363
GRESIK	TANDES	0,0243	0,12672	9,05531	13
KAPAL	PAITON	0,01879	0,12549	9,17303	475

3.3 Kapasitas Pembangkitan Jamali 2021

Data kapasitas dari pembangkit yang digunakan pada sistem Jawa – Madura – Bali tahun 2021 adalah sebagai berikut :

Tabel 3.2 Data kapasitas pembangkit Jamali 2021

Number of Bus	Name of Bus	Min (MW)	Max (MW)	Pembangkitan Peak (MW)	Pembangkitan Light (MW)
1	SURALAYA	1360	3400	3060	1598
1	SURALAYA_2	250	800	400	376
3	BANTEN	690	1725	1552.5	810.75
4	BOJANEGARA	800	2000	1600	600
5	BALARAJA	800	2000	1197	940
10	M.KARANG	847.6	2119	1398	995.93
11	PRIOK	932	2872	1830	1349.84
12	M.TAWAR	880.4	2650	2385	1245.5
15	T.PUCUT	1200	3000	2084	1410
22	MATENGGENG	360	900	810	423
23	CILACAP	907.6	2269	1577	1066.43
23	CILACAP_2	488	1220	1098	573.4
27	PAITON	1886	4725	3700	2220.75
27	PAITON	400	1000	800	470
28	JAWAI	640	1600	1360	752
32	CIRATA	403.2	1008	907.2	473.76
33	CISAKAN	416	1040	936	488.8
33	SAGULING	280	700	630	329
37	CIREBON	664	2060	1854	968.2
38	JATENG	760	1900	1710	893
39	INDRAMAYU	796	1990	1770	935.3
39	TUTIA	264	660	594	310.2
41	T.JATI	1056	4640	3600	2180.8
46	GRATI	305.8	1364.5	1076.4	641.315
48	GRESIK	888	3040	2736	1428.8

3.4 Data Beban Jamali 2021

Data kapasitas beban yang digunakan pada sistem Jawa – Madura – Bali tahun 2021 adalah sebagai berikut :

Tabel 3.3 Data kapasitas beban Jamali 2021

GITET	Daya Peak (MW)	Daya Light (MW)
1 SURALAYA	118.4	219
2 CILEGON	475.3	475.3
4 M.KARANG	256.4	900
5 BALARAJA	1260.9	2185.2
6 LENGKONG	707.3	900
7 BOGOR	158.9	2700
8 PRIOK	593	593
9 DURIKOSAMBI	1067	1950.3
10 KEMBANGAN	551	551
11 GANDUL	0	814
12 DEPOK	279.6	792
13 CIKALONG	512.8	638
14 BEKASI	579.2	1126
16 CAWANG	1315.3	1650.6
17 CIBINONG	522.2	522.2
18 TASIK	480.8	480.8
19 M.TAWAR	293.1	1500.3
20 CIBATU B	500	900
21 TAMBUN	379	900
22 CIBATU	746.8	746.8
23 DELTAMAS	578.1	900
24 CIRATA	439.5	597
25 MANDIRANCAN	382.1	450
26 U.BERUNG	653.6	653.6
27 BANDUNG SEL	331.5	477
28 RAWALO	764.9	1800
29 PEMALANG	322.7	900
30 T.JATI	373.1	450
31 UNGARAN	784.3	784.3
32 AMPEL	434.6	900
33 PEDAN	950.5	1050.3

Lanjutan Tabel 3.3

GITET	Daya Peak (MW)	Daya Light (MW)
34 NGIMBANG	542.4	642.4
35 TANDES	330.4	900
36 GRESIK	49.2	1260
37 KRIAN	1044.5	1045
38 KEDIRI	1071.4	1071.4
39 SURABAYA SEL	569.9	1350
40 GRATI	619.8	619.8
41 BANGIL	580.7	900
42 PAITON	704.7	704.7
43 KAPAL	693.4	900

3.5 Data Kontrol Generator

Pemodelan dinamis (stabilitas transien) dari sistem transmisi Jamali 500 kV dapat di lihat pada tabel 3.3. Ini termasuk model dinamis komponen kontrol sistem tenaga listrik yaitu exciter dan governor yang direpresentasikan sesuai standar industri untuk software stabilitas transien.

Nilai parameter yang di inputkan untuk data governor atau exciter pada generator mengikuti nilai sample data dari software Etap 12.6 dengan asumsi bahwa nilai tersebut adalah nilai terbaik untuk memperbaiki respon tegangan dan frekuensi setelah terjadinya gangguan.

Tabel 3.4 Pemodelan dinamis untuk unit generator pada sistem Jawa – Madura – Bali tahun 2021 500 kV

MODEL	STANDARD	DESKRIPSI	LOKASI PEMBANGKIT
Exciter			
ETAP-12.6 model	IEEE	IEEE Type 1	Semua unit generator sistem Jamali 2021

Lanjutan Tabel 3.4

MODEL	STANDARD	DESKRIPSI	LOKASI PEMBANGKIT
Governor			
ETAP-12.6 model	Industry	General Purpose Governor-Turbine system	Semua unit PLTA sistem Jamali 2021
ETAP-12.6 model	IEEE	IEEE Gas-Turbine	Semua unit PLTG dan PLTGU sistem Jamali 2021
ETAP-12.6 model	IEEE	General Steam-Turbine representation	Semua unit PLTU sistem Jamali 2021

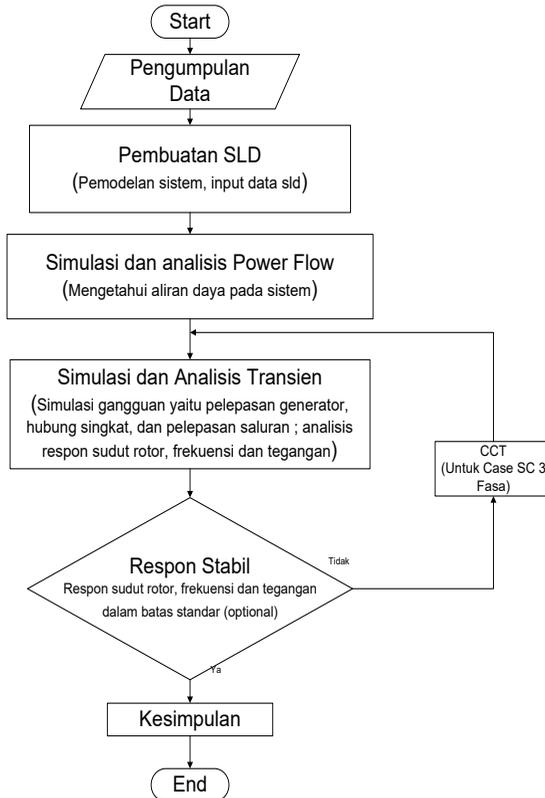
3.6 Metodologi Simulasi

Sebelum tahap simulasi dan analisa, diperlukan suatu metodologi tentang apa saja yang diperlukan untuk simulasi dan hasil simulasi seperti apa yang diinginkan. Metodologi yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu.

Berdasarkan gambar 3.2 di atas maka metodologi simulasi yang digunakan dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Dengan menggunakan data-data yang dari sistem kelistrikan Jamali 500 kV. Data-data meliputi data pembangkitan, data beban, dan data saluran dari masing-masing bus. Kemudian dilakukan studi aliran daya (*load flow analysis*) dengan ETAP 12.6.0 saat keadaan awal untuk mengetahui apakah sistem dalam kondisi normal atau tidak.
2. Simulasi Transien
Setelah menentukan studi kasus untuk analisis transien maka dilakukan simulasi sistem saat mengalami gangguan transien. Gangguan transien yang disimulasikan ada tiga yakni pelepasan generator, pelepasan saluran, dan gangguan hubung singkat.
3. Analisis Transien
Dari hasil simulasi transien akan dianalisis respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor akibat gangguan transien. Perubahan dari respon tegangan, frekuensi dan sudut rotor juga akan diamati dalam selang waktu yang ditentukan, apakah sistem kembali stabil atau tidak berdasarkan standar yang dijadikan acuan. Khusus untuk gangguan hubung singkat 3 fasa apabila

sistem dikatakan tidak stabil akan dilakukan penambahan waktu untuk trip CB sampai waktu stabil sistem atau dinamakan juga CCT.



Gambar 3.2 Flow chart metodologi

4. Penarikan Kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai kondisi kestabilan sistem akibat gangguan transien di Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV setelah masuknya Pembangkit Paiton 1000 MW tahun 2021 serta memberikan rekomendasi untuk mengatasi gangguan tersebut.

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

Stabilitas Transien Sistem Kelistrikan Transmisi Jamali 500kV tahun 2021

4.1 Studi Kasus Stabilitas Transien Sistem Kelistrikan Transmisi Jawa – Madura – Bali 500kV tahun 2021

Setelah didapatkan pemodelan dan penyederhanaan sistem kelistrikan transmisi Jawa-Madura-Bali 500kV tahun 2021 dalam bentuk single line diagram menggunakan *software* ETAP 12.6, maka selanjutnya dilakukan simulasi stabilitas transien meliputi lepasnya pembangkit, hubung singkat dan lepasnya saluran transmisi sesuai dengan studi kasus yang akan dipaparkan pada Tabel 4.2. Pada simulasi ini akan di analisa respon sudut rotor, tegangan dan frekuensi hasil simulasi. Pada simulasi stabilitas transien ini akan di-plot di beberapa titik diantaranya di generator dan bus yang mewakili tiap daerahnya. Titik yang di-plot berbeda untuk setiap studi kasus, tergantung dengan kebutuhan. *Total Simulation Time* menggunakan 20s tiap studi kasus dengan gangguan pada detik ke 2. Tabel 4.1 menunjukkan data pembangkitan dan beban sistem transmisi Jawa-Madura-Bali 500kV tahun 2021 pada kondisi operasi normal.

Tabel 4.1 Summary of Total Generation, Demand

Jamali 2021	MW (Peak)	MW (Light)
Swing Bus(es) :	3.060	1.598
Source (Non-Swing Bus) :	37.605,1	21.882,8
Total Demand :	38.900	23.018,3

Studi ini menganalisa stabilitas sistem setelah ada penambahan unit baru Paiton 1000 MW. Adapun kasus yang di analisis adalah :

1. *No-Fault Tripping of The Largest On-Line Generating Unit*

Pada kasus ini, dilakukan pemadaman pada generator terbesar pada saat terhubung pada sistem Jamali. Berdasarkan data yang ada generator terbesar di sistem memiliki kapasitas 1000 MW dan untuk kasus ini dipilih generator Paiton 1000 MW off sedangkan generator pembangkit lain aktif.

2. Critical Fault Clearing Time

Pada kasus ini dilakukan tiga kali percobaan, yang pertama terjadi hubung singkat 3 fasa di bus yang memiliki nilai arus hubung singkat terbesar dan diikuti lepasnya satu saluran dari saluran ganda, yang kedua di bus nilai arus hubung singkat terbesar kedua dan ketiga di bus dengan nilai arus hubung singkat terbesar ketiga yang kemudian dicari waktu pemutusan kritisnya.

3. No-Fault Double-Circuit Tripping of Interconnection Transmission Line

Pada kasus ini saluran ganda yang memiliki aliran daya terbesar lepas (kehilangan transfer daya) tanpa gangguan.

4. No-Fault One-Circuit Tripping of the Double-Circuit Interconnection Transmission Line

Pada kasus ini satu saluran dari saluran ganda yang memiliki aliran daya terbesar lepas (kehilangan transfer daya) tanpa gangguan.

5. Single Pole Auto Reclosing

Pada kasus ini terjadi hubung singkat 1 fasa ketanah di bus yang memiliki arus hubung singkat terbesar.

Dalam Analisis Stabilitas Transien terdapat beberapa parameter yang diamati dalam analisis stabilitas transien ini adalah :

1. Sudut rotor main generator sesaat dan setelah terjadi gangguan.
2. Frekuensi Bus sesaat dan setelah terjadi gangguan.
3. Tegangan Bus sesaat dan setelah terjadi gangguan.

Agar lebih mudah dalam memahami kasus-kasus yang akan disimulasikan pada Tugas Akhir ini dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut

Tabel 4.2. Studi Kasus Stabilitas Transien

Kasus		Keterangan Kasus	Aksi	Waktu (detik)	Daya
1	Kasus 1	Generator Paiton 10 trip	Paiton 10 delete	2	800 MW

Lanjutan tabel 4.2

Kasus		Keterangan Kasus	Aksi	Waktu (detik)	Daya
2	Kasus 2a	Hubung singkat saluran Depok – Cibinong	3 phase fault	2	-
		Trip satu saluran dari dobel sirkit	CB 42 & 41 open, CB antara saluran Depok-Cibinong		-
	Kasus 2b	Hubung singkat saluran Gandul-Cawang	3 phase fault	2	-
		Trip satu saluran dari dobel sirkit	CB 43 & 44 open, CB antara saluran Gandul-Cawang		-
	Kasus 2c	Hubung singkat saluran M.Tawar – Cibatu 2	3 phase fault	2	-
		Trip satu saluran dari dobel sirkit	CB 52 & 53 open, CB antara saluran M.Tawar – Cibatu 2		-
3	Kasus 3	Trip Saluran dobel sirkit	CB 11 & 12 open (saluran Suralaya-Cilegon)	2	-
4	Kasus 4	Trip satu saluran dari dobel sirkit	• CB 11 & 12 open (saluran Suralaya-Cilegon)	2	-

Lanjutan tabel 4.2

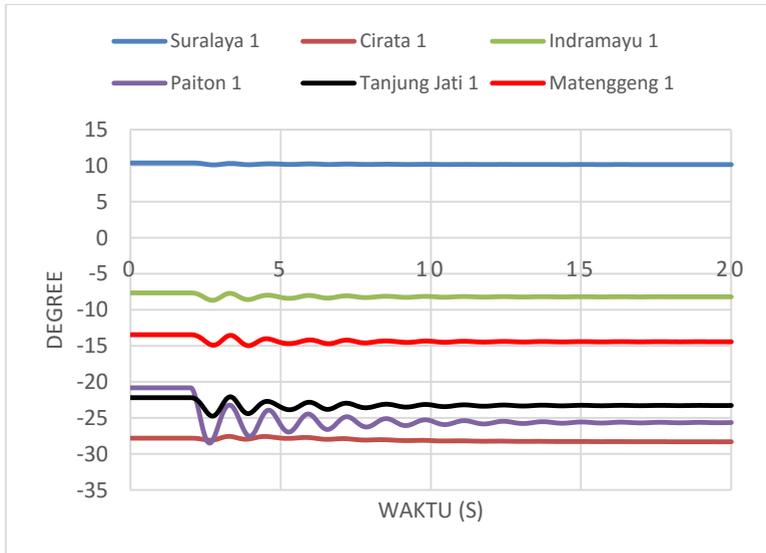
Kasus		Keterangan Kasus	Aksi	Waktu (detik)	Daya
5	Kasus 5	Hubung singkat saluran Bekasi – Muara Tawar	<i>Line-Ground phase fault</i>	2	-
		Trip satu line dari double sirkit	<ul style="list-style-type: none"> • CB 51 open, CB double sirkit Cibatu-Muara Tawar • CB 319 close, CB single sirkit Cibatu-Muara Tawar 	2.2	-
		<i>Recloser</i> bekerja (saluran double sirkit on)	<ul style="list-style-type: none"> • CB 51 close, CB double sirkit Cibatu-Muara Tawar • CB 319 open, CB single sirkit Cibatu-Muara Tawar • Clear Fault 	2.5	-

4.2 Simulasi Stabilitas Transien

4.2.1 Kasus 1 Paiton 10 Off (Semua Pembangkit Jamali On) : Paiton 10 Delete ($t = 2$ s)

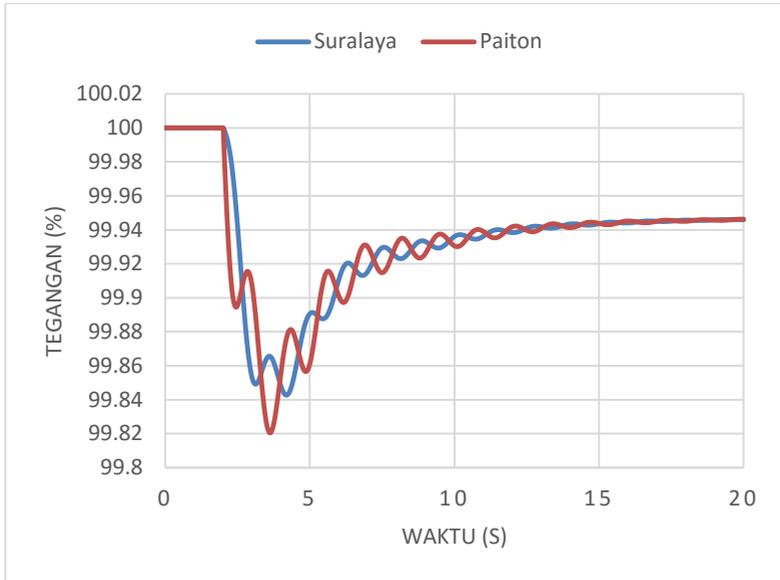
- Kondisi operasi beban dasar

Pada kasus ini sistem akan kehilangan daya dengan nilai kapasitas 1000 MW. Pembangkit ini dioperasikan sebagai voltage control dengan daya 470 MW sedangkan daya keseluruhan yang dibangkitkan 23.480,8 MW dan kebutuhan bebannya 23.018,3 MW. Sehingga ketika terjadi kasus Paiton 10 off sistem hanya kehilangan daya sebesar 470 MW atau 2,002 % dari keseluruhan daya yang dibangkitkan dan daya yang dibangkitkan sistem masih mencukupi kebutuhan bebannya. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



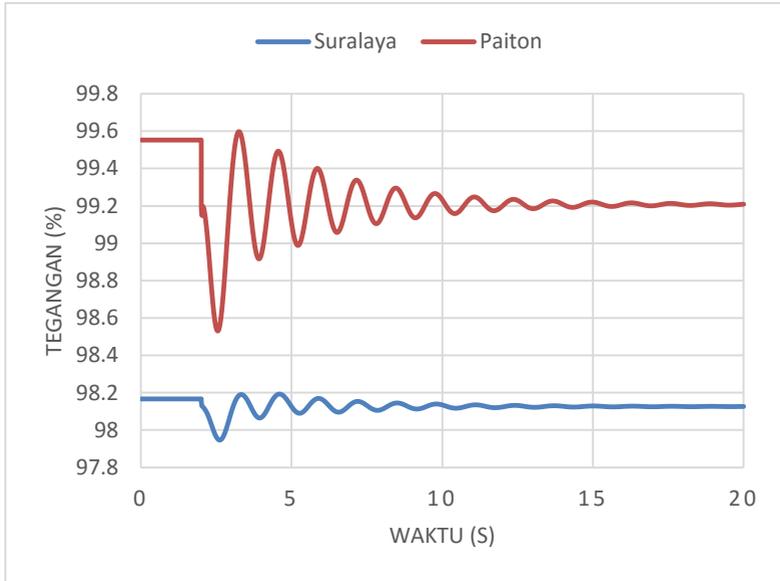
Gambar 4.1 Respon Sudut Rotor 6 generator ketika Paiton 10 trip

Ketika pembangkit Paiton 10 lepas dengan daya pembangkitan sebesar 470 MW maka sudut rotor semua generator pada sistem akan berubah. Dapat dilihat pada gambar 4.1 yaitu, pada generator Suralaya 1 nilainya turun dari 10,4 *degree* dan *steady state* pada 10.18 *degree*. Kemudian pada Cirata 1 nilainya naik dari -27,8 *degree* ke *steady state* pada -28,3 *degree*, untuk Indramayu 1 nilai sudut rotornya sedikit mengalami osilasi dan *steady state* pada -8,18 *degree* dari nilai awal -7,63 *degree*. Sedangkan generator Paiton, Tanjung Jati dan Matenggeng mengalami osilasi dan penurunan nilai sudut rotor tetapi dapat kembali *steady state*. Sudut rotor diatas mengalami perubahan disebabkan beberapa hal yaitu, pembebanan generator, inersia dan damping generator masing-masing generator. Generator yang memiliki inersia dan damping yang besar akan cenderung lebih stabil jika terjadi gangguan dan sebaliknya. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil.



Gambar 4.2 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Paiton ketika Paiton 10 trip

Ketika pembangkit Paiton 10 lepas menyebabkan rpm atau putaran dari generator yang terhubung ke sistem akan turun. Hal ini akan mengakibatkan nilai dari frekuensi sistem juga akan turun. Kasus ini disebabkan berkurangnya daya yang di suplai secara mendadak, akibatnya pada beberapa saat torsi beban akan lebih besar daripada torsi pembangkitan. Untuk kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus swing Suralaya dan bus generator yang dilepas itu sendiri yaitu Paiton. Dapat dilihat pada gambar 4.2 diketahui bahwa nilai frekuensi akibat lepasnya generator terbesar masih pada batas frekuensi yang diijinkan. Saat terjadi gangguan yaitu pada waktu 2s sesaat terjadi penurunan frekuensi untuk bus Suralaya sebesar 49,92 Hz sedangkan bus Paiton 49,91 Hz kemudian nilainya meningkat sampai mencapai *steady state* pada frekuensi masing-masing 49,97%. Berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem masih dalam range yang aman. Turunnya frekuensi sampai 49.92 Hz ini disebabkan sistem kehilangan daya aktif sebesar 470 MW, sehingga frekuensi turun sesaat, tetapi dapat kembali stabil karena sistem masih memiliki cadangan daya aktif yang besar.



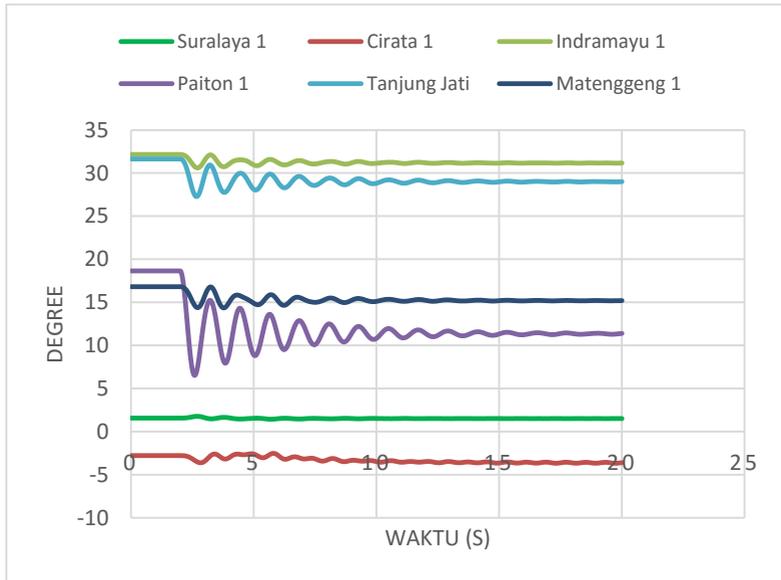
Gambar 4.3 Respon Tegangan bus Suralaya dan Paiton ketika Paiton 10 trip

Saat terjadi gangguan, respon tegangan di bus Suralaya maupun Paiton mengalami fluktuasi nilai tegangan yang tidak terlalu besar. Kondisi ini disebabkan karena berkurangnya suplai daya reaktif akibat lepasnya generator Paiton 10 sehingga sesaat akan terjadi penurunan tegangan pada bus. Tetapi penurunan tersebut tidak terlalu besar dan dapat kembali *steady state* atau stabil. Respon ini akibat adanya suplai daya reaktif dari generator lain melalui sistem interkoneksi. Pada kasus ini menurut standart PLN tegangan untuk sistem 500 kV masih dalam batas aman.

- Kondisi operasi beban puncak

Pada kasus ini sistem akan kehilangan daya dengan nilai kapasitas 1000 MW. Pembangkit ini dioperasikan sebagai voltage control dengan daya 800 MW sedangkan daya keseluruhan yang dibangkitkan 40.665,1 MW dan kebutuhan bebannya 38.900 MW. Sehingga ketika terjadi kasus Paiton 10 off sistem hanya kehilangan daya sebesar 800 MW atau 1,97 %

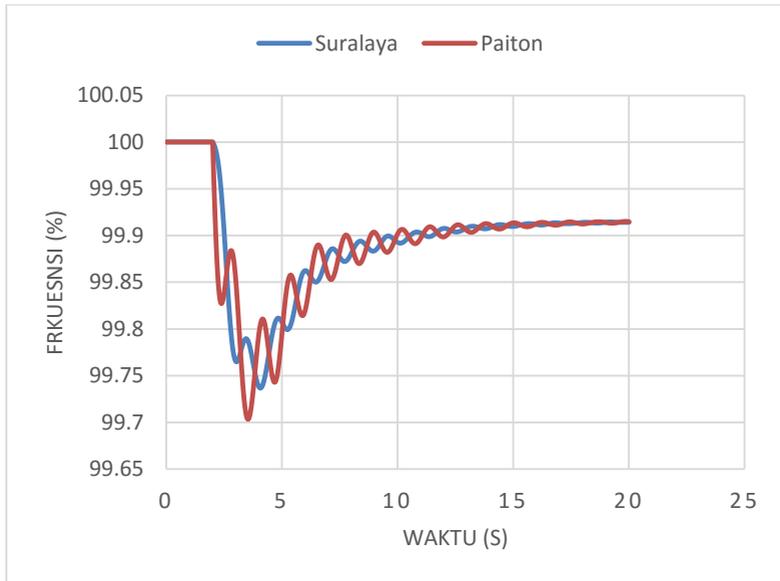
dari keseluruhan daya yang dibangkitkan dan daya yang dibangkitkan sistem masih mencukupi kebutuhan bebannya. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.



Gambar 4.4 Respon Sudut Rotor 6 generator ketika Paiton 10 trip

Ketika pembangkit Paiton 10 lepas dengan daya pembangkitan sebesar 800 MW maka sudut rotor semua generator pada sistem akan berubah. Dapat dilihat pada gambar 4.4 yaitu, pada generator Suralaya 1 nilainya turun dari 1,57 *degree* ke 1,44 *degree* dan *steady state* pada 1,51 *degree*. Kemudian pada Cirata 1 nilai sudut rotornya sedikit mengalami osilasi ketika gangguan dan *steady state* pada -3,59, untuk Indramayu 1 nilai sudut rotornya sedikit mengalami osilasi dan *steady state* pada 31,17 dari nilai awal 32,16. Sedangkan generator Paiton, Grati dan Matenggeng mengalami osilasi dan penurunan nilai sudut rotor tetapi dapat kembali *steady state*. Sudut rotor diatas mengalami perubahan disebabkan beberapa hal yaitu, pembebanan generator, inersia dan damping generator masing-masing generator. Generator yang memiliki inersia dan damping yang besar akan cenderung lebih stabil jika terjadi gangguan dan

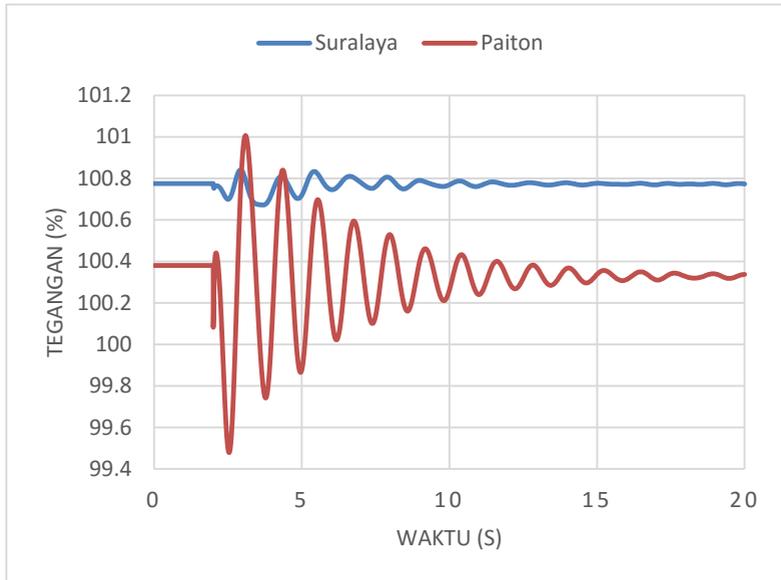
sebaliknya. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil.



Gambar 4.5 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Paiton ketika Paiton 10 trip

Ketika pembangkit Paiton 10 lepas menyebabkan rpm atau putaran dari generator yang terhubung ke sistem akan turun. Hal ini akan mengakibatkan nilai dari frekuensi sistem juga akan turun. Kasus ini disebabkan berkurangnya daya yang di suplai secara mendadak, akibatnya pada beberapa saat torsi beban akan lebih besar daripada torsi pembangkitan. Untuk kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus swing Suralaya dan bus generator yang dilepas itu sendiri yaitu Paiton. Dapat dilihat pada gambar 4.6 diketahui bahwa nilai frekuensi akibat lepasnya generator terbesar masih pada batas frekuensi yang diijinkan. Saat terjadi gangguan yaitu pada waktu 2s sesaat terjadi penurunan frekuensi untuk bus Suralaya sebesar 49,87 Hz sedangkan bus Paiton 49.85 Hz kemudian nilainya meningkat sampai mencapai *steady state* pada frekuensi masing-masing 49,95%. Berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem masih dalam range yang aman. Turunnya frekuensi

sampai 49.87 Hz ini disebabkan sistem kehilangan daya aktif sebesar 800 MW, sehingga frekuensi turun sesaat, tetapi dapat kembali stabil karena sistem masih memiliki cadangan daya aktif yang besar.



Gambar 4.6 Respon Tegangan bus Suralaya dan Paiton ketika Paiton 10 trip

Saat terjadi gangguan, respon tegangan di bus Suralaya maupun Paiton mengalami fluktuasi nilai tegangan yang tidak terlalu besar. Kondisi ini disebabkan karena berkurangnya suplai daya reaktif akibat lepasnya generator Paiton 10 sehingga sesaat akan terjadi penurunan tegangan pada bus. Tetapi penurunan tersebut tidak terlalu besar dan dapat kembali *steady state* atau stabil. Respon ini akibat adanya suplai daya reaktif dari generator lain melalui sistem interkoneksi. Pada kasus ini menurut standart PLN tegangan untuk sistem 500 kV masih dalam batas aman.

4.2.2 Kasus 2 *Critical Fault Clearing Time* ($t = 2s$)

Pada kasus ini, *critical fault clearing time* disebabkan oleh saluran yang terhubung double sirkuit terkena gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah. Sehingga dilakukan simulasi hubung singkat terlebih dahulu untuk

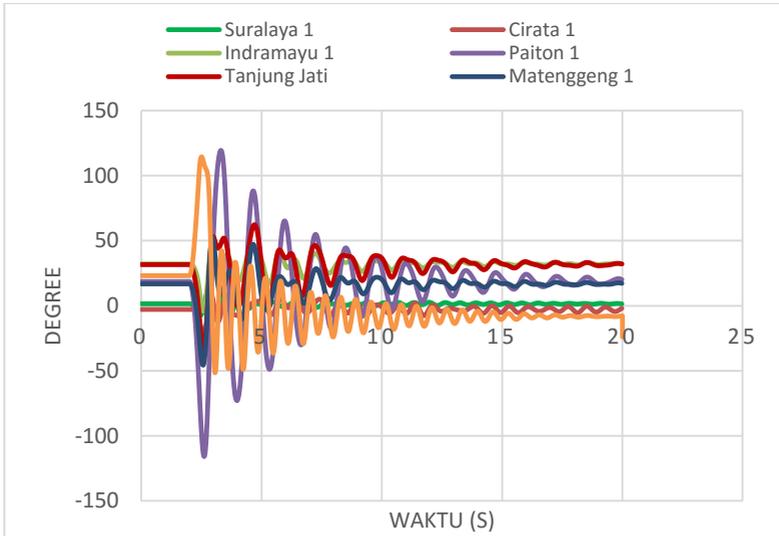
mengetahui nilai hubung singkat terbesar di saluran. Dan berdasarkan tabel 4.3 kasus yang disimulasikan yaitu pada saluran di Depok, Gandul, dan Muara Tawar. Untuk menentukan waktu *trip* CB dilakukan metode *trial and error* dengan mengatur waktu pemutusan yang tepat pada saluran sebelum sistem menjadi tidak stabil. Pada kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus swing Suralaya dan bus terdekat dengan saluran yang terkena hubung singkat. Waktu pemutusan CB sebelum sistem menjadi tidak stabil adalah *critical fault clearing time*. Pada simulasi berikut yang diperhitungkan hanya ketika operasi beban puncak, untuk hasil simulasinya sebagai berikut.

Tabel 4.3 Data Short Circuit 3 fasa pada bus Jamali

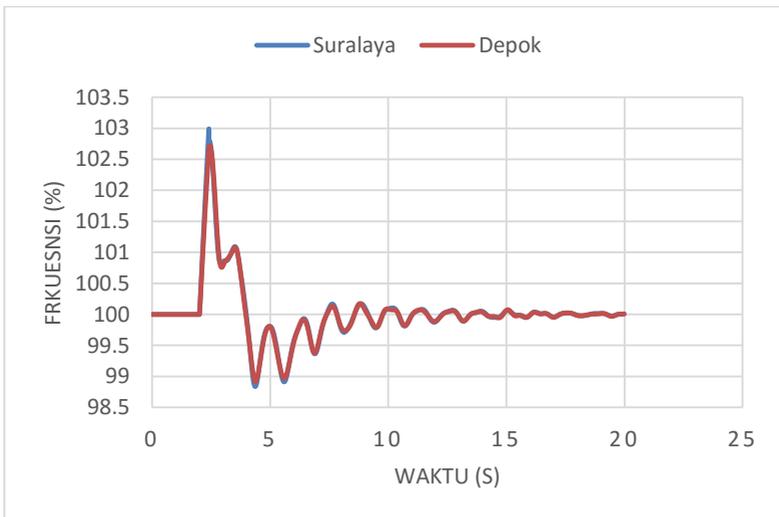
Bus	Short Circuit (kA)
	Peak
Suralaya	79,38
Paiton	51,74
Gresik	49,43
Rawalo	43,23
Depok	140,8
Gandul	134,5
Muara Tawar	117,6

- Kondisi operasi beban puncak (SC di bus Depok)

Dapat dilihat pada gambar 4.7 ketika terjadi hubung singkat tiga fasa ke tanah maka setelah CB dibuka saat 0,4 sekon sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi dapat kembali steady state pada nilai yang baru, sedangkan generator Paiton mengalami osilasi yang cukup besar sampai minimal -115,82 *degree* dan maksimal 119,35 *degree* tetapi nilainya dapat kembali steady state. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil. Dan batasan CB untuk trip pada kasus diatas sesuai dengan standar waktu pemutusan CB sistem transmisi 500 kV yaitu 80 ms.



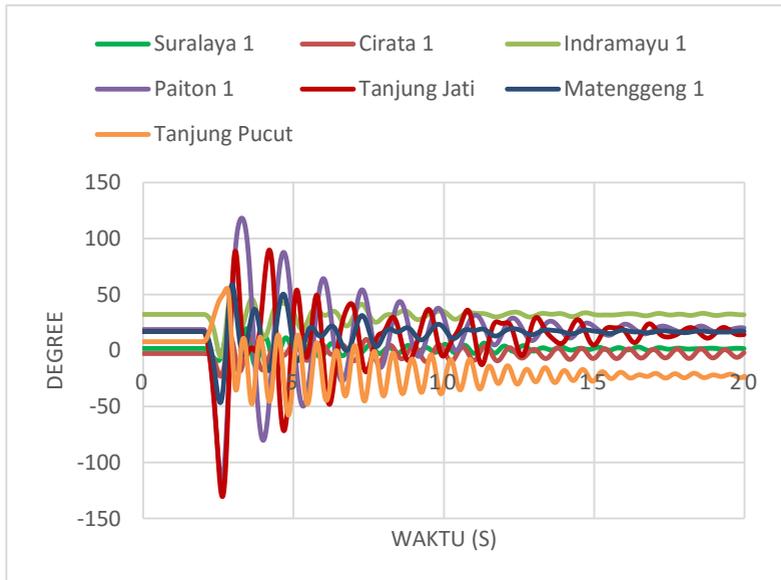
Gambar 4.7 Respon Sudut Rotor 7 generator ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms



Gambar 4.8 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Depok ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms

Dapat dilihat pada gambar 4.8 respon frekuensi antara bus Suralaya dengan bus Depok memiliki kesamaan ketika terjadi gangguan frekuensi sistem terjadi osilasi mencapai maksimal 51,49 Hz dan minimal 48,42 Hz tetapi frekuensi sistem atau bus dapat kembali ke nilai *steady state* pada 50,004 Hz dan diketahui berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem masih dalam range yang aman.

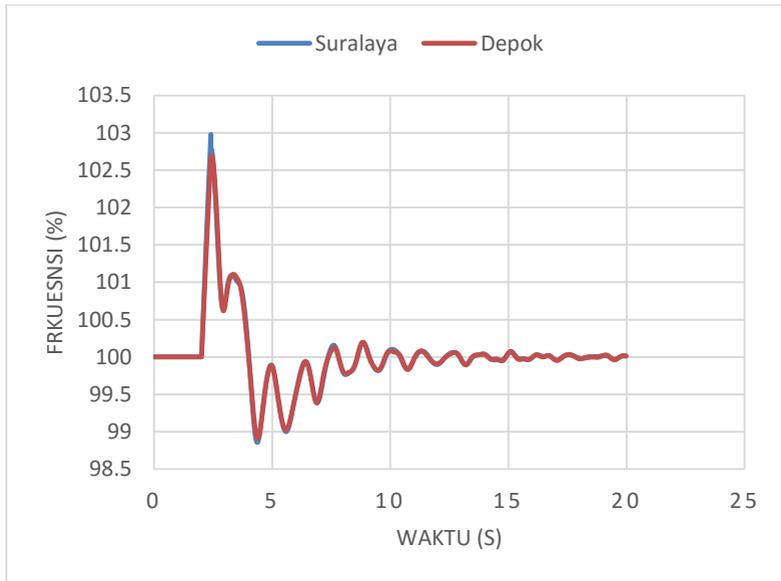
- Kondisi operasi beban puncak (SC di bus Gandul)



Gambar 4.9 Respon Sudut Rotor 8 generator ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms

Dapat dilihat pada gambar 4.9 ketika terjadi hubung singkat tiga fasa ke tanah maka sudut rotor semua generator mengalami osilasi sesaat setelah CB dibuka 0,4 sekon dan yang paling besar terjadi di generator Paiton nilainya mencapai 118,12 *degree* dan -116,15 *degree* tetapi respon tersebut sesaat dan sudut rotornya menuju nilai *steady state*. Sedangkan generator yang lain memiliki respon yang sama yaitu mengalami osilasi sesaat dan kemudian nilainya cenderung menuju ke titik *steady state*. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat

kembali stabil. Dan batasan CB untuk trip pada kasus diatas sesuai dengan standar waktu pemutusan CB sistem transmisi 500 kV yaitu 80 ms.



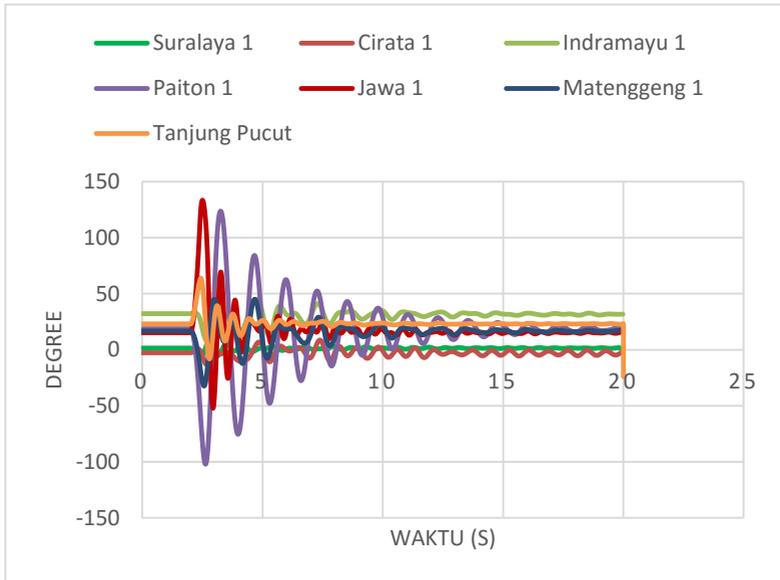
Gambar 4.10 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Gandul ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms

Dapat dilihat pada gambar 4.10 respon frekuensi antara bus Suralaya dengan bus Gandul memiliki kesamaan ketika terjadi gangguan frekuensi sistem terjadi osilasi sesaat setelah gangguan tetapi frekuensi sistem atau bus dapat kembali ke nilai *steady state* dalam range nilai yang sesuai standart ANSI/IEEE C37.106-1987.

- Kondisi operasi beban puncak (SC di bus Muara Tawar)

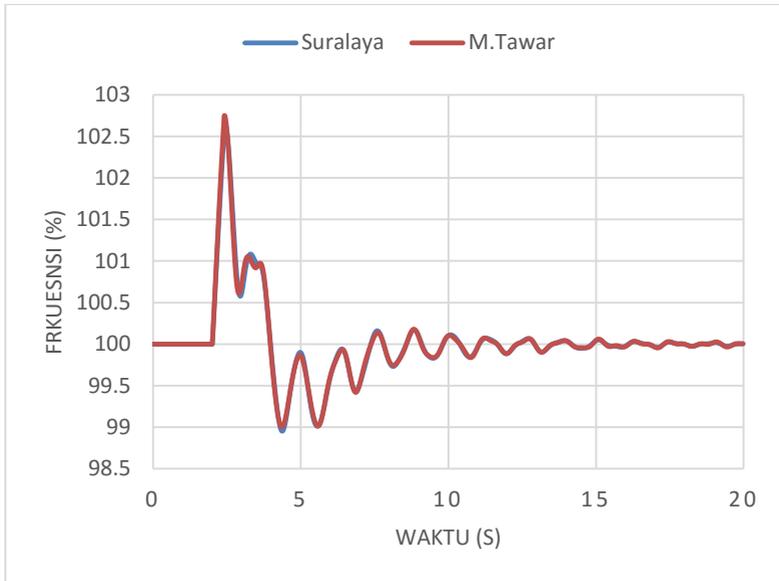
Dapat dilihat pada gambar 4.11 ketika terjadi hubung singkat tiga fasa ke tanah maka sudut rotor semua generator mengalami osilasi sesaat setelah CB dibuka 0,4 sekon dan yang paling besar terjadi di generator Paiton tetapi respon tersebut terus mengecil dan sudut rotornya relatif menuju nilai *steady state*. Sedangkan generator yang lain memiliki respon yang sama yaitu mengalami osilasi sesaat dan kemudian nilainya cenderung menuju ke titik *steady state*. Sehingga dapat disimpulkan sudut

rotor generator dari sistem dapat kembali stabil. Dan batasan CB untuk trip pada kasus diatas sesuai dengan standar waktu pemutusan CB sistem transmisi 500 kV yaitu 80 ms.



Gambar 4.11 Respon Sudut Rotor 7 generator ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms

Dapat dilihat pada gambar 4.12 respon frekuensi antara bus Suralaya dengan bus Muara Tawar memiliki kesamaan ketika terjadi gangguan frekuensi sistem terjadi osilasi sesaat setelah gangguan tetapi frekuensi sistem atau bus dapat kembali ke nilai *steady state* dalam range nilai yang sesuai standart ANSI/IEEE C37.106-1987.



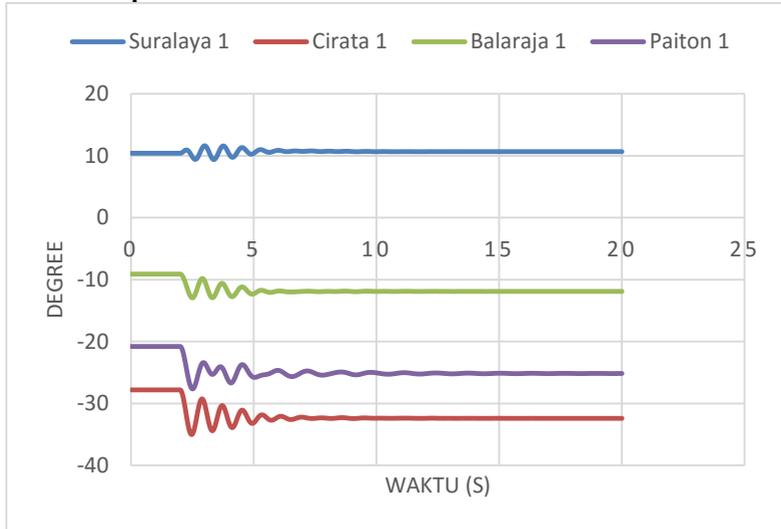
Gambar 4.12 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat tiga fasa ke tanah untuk gangguan selama 400 ms

4.2.3 Kasus 3 *No-Fault Double-Circuit Tripping of Interconnection Transmission Line (t = 2s)*

Untuk sistem berdaya besar dengan jumlah pembangkit yang banyak terkoneksi dengan sistem berdaya kecil dengan jumlah pembangkit yang sedikit, lepasnya line interkoneksi akan memberikan dampak ketidakstabilan pada sistem berdaya kecil tersebut. Sehingga pada kasus ini diperlukan simulasi load flow terlebih dahulu untuk mengetahui aliran daya terbesar yang mengalir di kabel transmisi.

Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada line transmisi untuk kasus beban puncak dan beban dasar berada di saluran Suralaya-Cilegon. Pada simulasi transien ini satu saluran dari double circuit trip tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor dan frekuensi sistem Jamali. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.

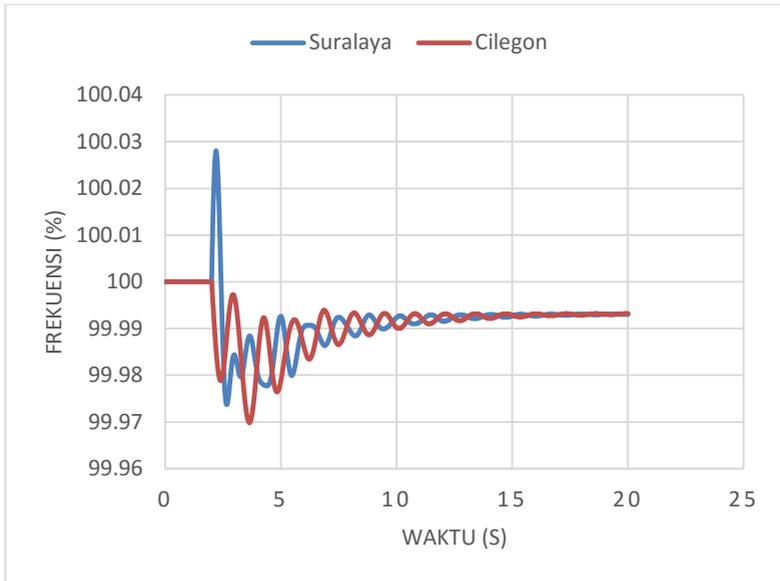
- Kondisi operasi beban dasar



Gambar 4.13 Respon Sudut Rotor generator ketika saluran antara Suralaya-Cilegon trip

Saat saluran double bus antara Suralaya-Cilegon lepas maka sudut rotor semua generator pada sistem akan berubah. Dapat dilihat pada gambar 4.13 yaitu, pada hampir semua generator mengalami kemiripan respon yaitu ketika terjadi gangguan nilai sudut generator akan turun dan sempat mengalami osilasi tetapi dapat kembali ke keadaan *steady state*. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil.

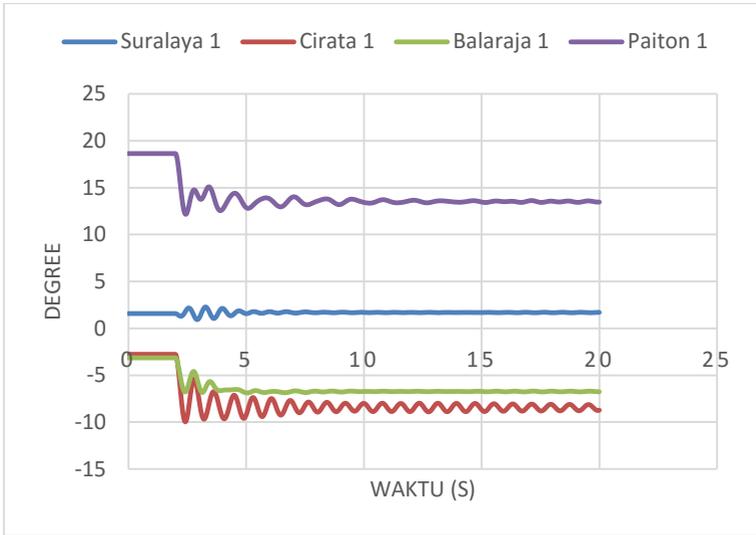
Ketika saluran double bus antara Suralaya-Cilegon lepas ketika waktu 2 s. Untuk kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus terdekat dari terjadinya gangguan yaitu yaitu Suralaya dan Cilegon. Dapat dilihat pada gambar 4.14 diketahui bahwa nilai frekuensi akibat lepasnya saluran double bus masih pada batas frekuensi yang diijinkan. Dan pada saat terjadi gangguan yaitu pada waktu 2s sesaat terjadi fluktuasi frekuensi untuk bus Suralaya maupun Cilegon yang nilainya tidak terlalu besar kemudian osilasi mengecil sampai mencapai *steady state* pada frekuensi masing-masing 49,99 Hz. Berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem masih dalam range yang aman.



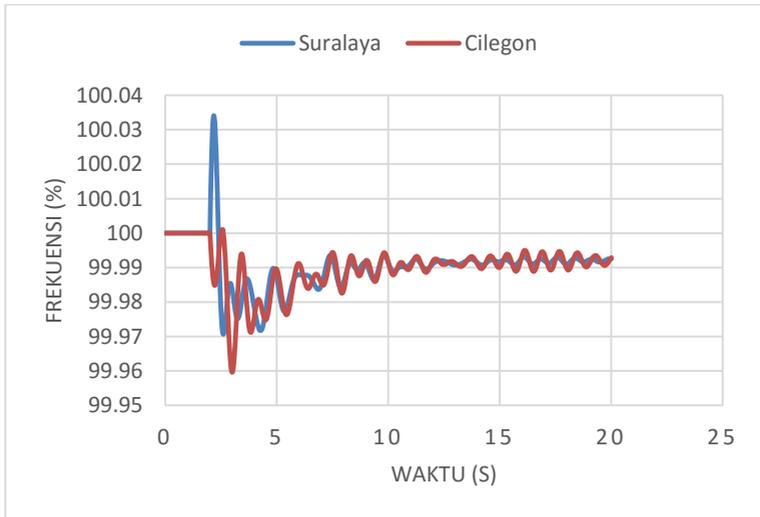
Gambar 4.14 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Cilegon ketika saluran Suralaya-Cilegon trip

- Kondisi operasi beban puncak

Dapat dilihat pada gambar 4.15, saat saluran double sirkit antara Suralaya-Cilegon lepas maka sudut rotor semua generator pada sistem akan mendapatkan nilai baru. Respon pada hampir semua generator di sistem mengalami kemiripan yaitu ketika terjadi gangguan nilai sudut rotor generator akan turun dan mengalami osilasi tetapi dapat kembali ke keadaan *steady state*. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil.



Gambar 4.15 Respon Sudut Rotor generator ketika saluran antara Suralaya-Cilegon trip



Gambar 4.16 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Cilegon ketika saluran Suralaya-Cilegon trip

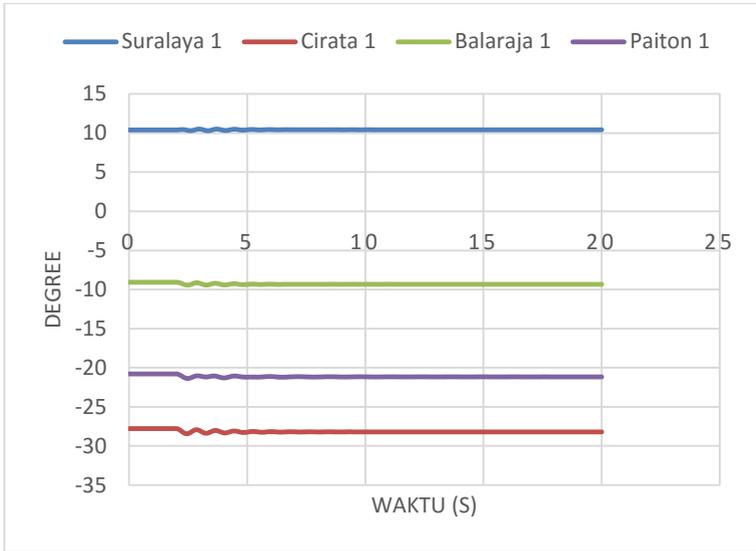
Ketika saluran dobel sirkit antara Suralaya-Cilegon lepas ketika waktu 2 s. Untuk kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus terdekat dari terjadinya gangguan yaitu yaitu Suralaya dan Cilegon. Dapat dilihat pada gambar 4.16 diketahui bahwa nilai frekuensi akibat lepasnya saluran dobel sirkit masih pada batas frekuensi yang diijinkan. Dan pada saat terjadi gangguan yaitu pada waktu 2s sesaat terjadi fluktuasi frekuensi untuk bus Suralaya maupun Cilegon yang nilainya cukup kecil kemudian osilasi mengecil sampai mencapai *steady state* pada frekuensi masing-masing 49,99 Hz. Berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem masih dalam range yang aman.

4.2.4 Kasus 4 *No-Fault One-Circuit Tripping of the Double-Circuit Interconnection Transmission Line (t = 2s)*

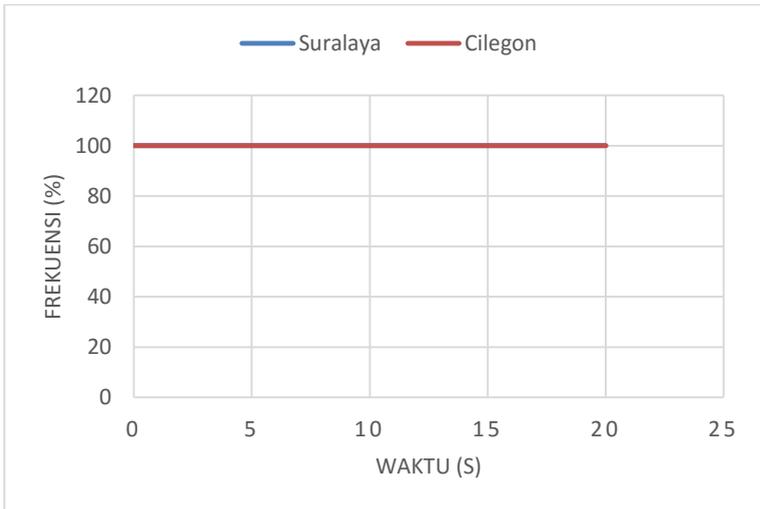
Untuk sistem berdaya besar dengan jumlah pembangkit yang banyak terkoneksi dengan sistem berdaya kecil dengan jumlah pembangkit yang sedikit, lepasnya line interkoneksi akan memberikan dampak ketidakstabilan pada sistem berdaya kecil tersebut. Sehingga pada kasus ini diperlukan simulasi load flow terlebih dahulu untuk mengetahui aliran daya terbesar yang mengalir di kabel transmisi. Nilai aliran daya terbesar yang mengalir pada line transmisi untuk kasus beban puncak dan beban dasar berada di saluran Suralaya-Cilegon. Pada simulasi transien ini satu saluran dari dobel sirkit trip tanpa adanya gangguan. Pengamatan yang dilakukan untuk kasus ini adalah respon sudut rotor dan frekuensi sistem Jamali. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.

- Kondisi operasi beban dasar

Saat satu saluran dari dobel sirkit antara Suralaya-Cilegon lepas maka sudut rotor semua generator pada sistem akan berubah. Dapat dilihat pada gambar 4.17 yaitu, pada semua generator mengalami kemiripan respon yaitu ketika terjadi gangguan nilai sudut generator akan turun dan sempat mengalami sedikit osilasi tetapi dapat kembali ke keadaan *steady state*. Untuk gangguan ini dapat dikatakan tidak memberikan pengaruh yang berarti untuk sistem karena sistem di desain secara dobel sirkit untuk kontinuitas penyaluran daya sehingga ketika terjadi lepas satu saluran, saluran yang lain bisa mem*backup*. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil.



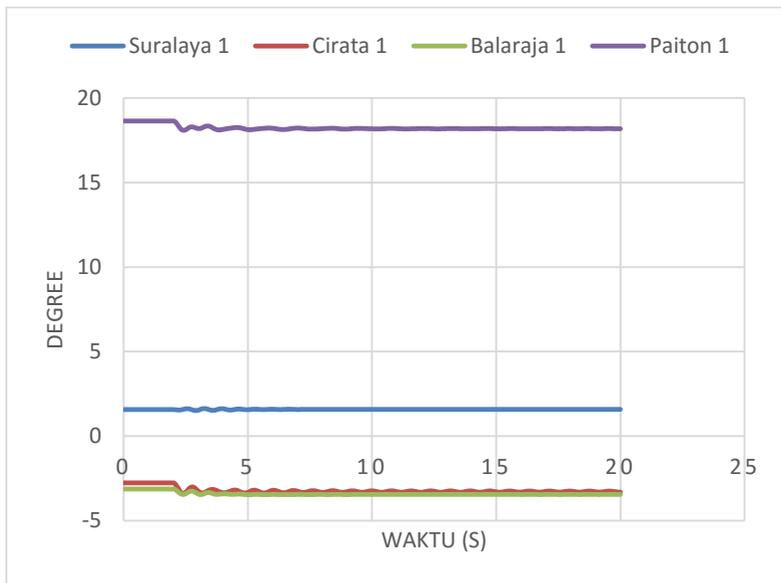
Gambar 4.17 Respon Sudut Rotor generator ketika satu saluran Suralaya-Cilegon trip



Gambar 4.18 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Cilegon ketika satu saluran Suralaya-Cilegon trip

Untuk kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus terdekat dari terjadinya gangguan yaitu yaitu Suralaya dan Cilegon. Dapat dilihat pada gambar 4.18 diketahui bahwa nilai frekuensi akibat lepasnya satu saluran dari saluran dobel sirkit, bus atau sistem tidak merasakan adanya gangguan karena aliran daya masih dapat mengalir melalui satu saluran yang lain sehingga nilai frekuensi dari awal hingga setelah gangguan terus *steady state* di nilai 50 Hz. Berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem dalam range yang aman.

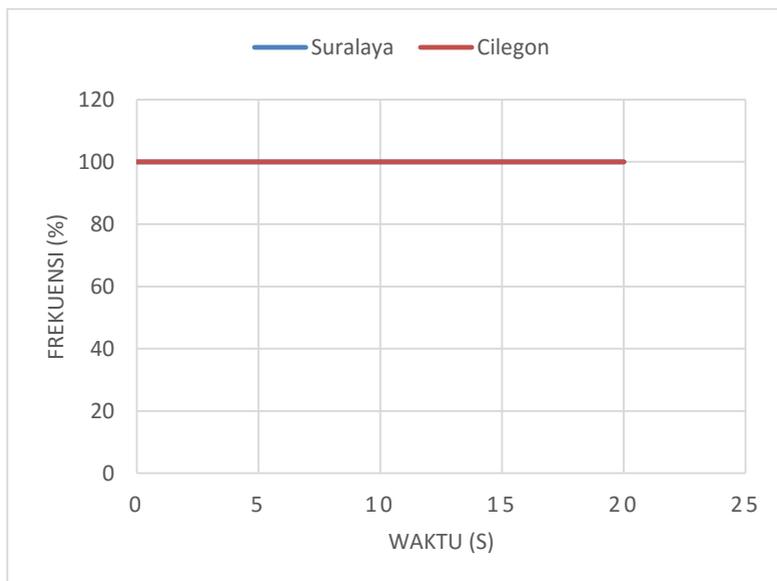
- Kondisi operasi beban puncak



Gambar 4.19 Respon Sudut Rotor generator ketika satu saluran Suralaya-Cilegon trip

Dapat dilihat pada gambar 4.19, saat saluran dobel sirkit antara Suralaya-Cilegon lepas maka sudut rotor semua generator pada sistem akan mendapatkan nilai baru. Sudut rotor diatas mengalami perubahan disebabkan beberapa hal yaitu, pembebanan generator, inersia dan damping generator masing-masing generator. pada semua generator mengalami kemiripan respon yaitu ketika terjadi gangguan nilai sudut

generator akan turun dan sempat mengalami sedikit osilasi tetapi dapat kembali ke keadaan *steady state*. Untuk gangguan ini dapat dikatakan tidak memberikan pengaruh yang berarti untuk sistem karena sistem di desain secara dobel sirkit untuk kontinuitas penyaluran daya sehingga ketika terjadi lepas satu saluran, saluran yang lain bisa *membakup*. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil.



Gambar 4.20 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Cilegon ketika satu saluran Suralaya-Cilegon trip

Untuk kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus terdekat dari terjadinya gangguan yaitu yaitu Suralaya dan Cilegon. Dapat dilihat pada gambar 4.20 diketahui bahwa nilai frekuensi akibat lepasnya satu saluran dari saluran dobel sirkit, bus atau sistem tidak merasakan adanya gangguan karena aliran daya masih dapat mengalir melalui satu saluran yang lain sehingga nilai frekuensi dari awal hingga setelah gangguan terus *steady state* di nilai 50 Hz. Berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem dalam range yang aman.

4.2.5 Kasus 5 Single Pole Auto Reclosing ($t = 2 \text{ s}$)

Salah satu jenis gangguan yang dapat mengakibatkan sistem keluar dari batas stabil adalah gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat satu fasa ketanah merupakan gangguan yang paling sering terjadi. Sehingga dalam kasus ini akan disimulasikan dan dianalisa pe hubung singkat yang terjadi pada bus dan responnya terhadap sistem.

Untuk penentuan lokasi dari hubung singkat sama seperti kasus *critical fault clearing time* yaitu dilakukan simulasi hubung singkat terlebih dahulu untuk menentukan lokasi dengan nilai hubung singkat terbesar. Hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi ketika 0,2 sekon diikuti dengan membukanya CB salah satu saluran dari saluran double sirkit dan 0,3 sekon kemudian setelah gangguan hilang CB ditutup kembali. Untuk hasil simulasinya sebagai berikut.

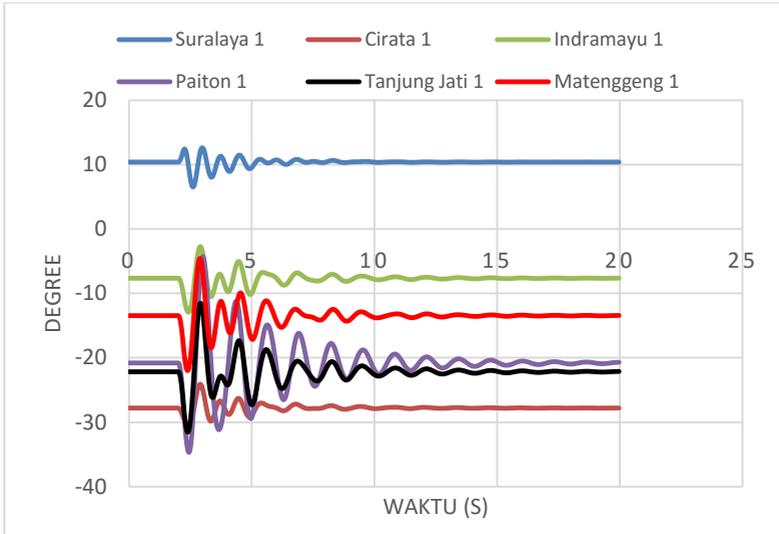
Tabel 4.4 Data Short Circuit 1 fasa ke tanah pada bus Jamali

Bus	Short Circuit (kA)	Short Circuit (kA)
	Peak	Light
Suralaya	67,83	57,39
Paiton	23,37	18,48
Gresik	42,21	28,91
Rawalo	10,09	9,12
Depok	48,87	43,64
Gandul	46,89	42,31
Muara Tawar	74,6	58,63

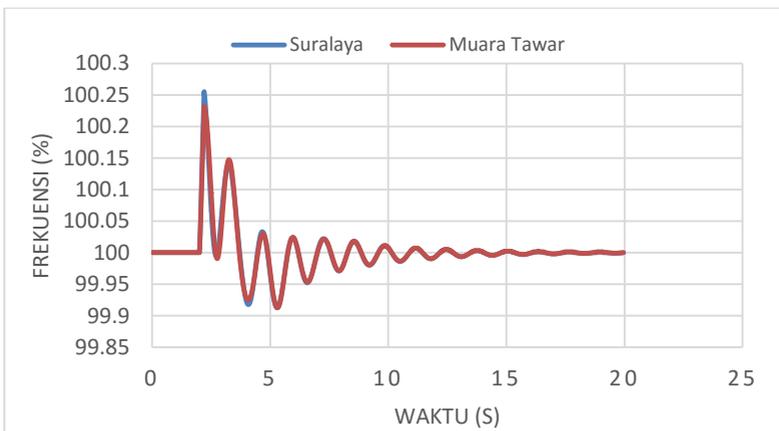
- Kondisi operasi beban dasar

Dapat dilihat pada gambar 4.21 ketika terjadi hubung singkat satu fasa ke tanah maka sudut rotor semua generator pada mengalami osilasi tetapi dapat kembali ke nilai awal, seperti pada generator Suralaya 1 nilainya sempat mengalami osilasi tetapi bisa kembali *steady state* pada 10.41 *degree* dari 10.4 *degree*. Kemudian pada Cirata 1 nilainya mengalami osilasi tetapi bisa kembali *steady state* dari -27,8 *degree* ke -27,8 *degree*. Sedangkan generator Indramayu, Paiton, Tanjung Jati dan Matenggeng memiliki respon yang sama yaitu sempat mengalami osilasi tetapi dapat kembali *steady state*. Sudut rotor diatas mengalami osilasi dan bisa kembali ke nilai semula disebabkan gangguan hubung singkat

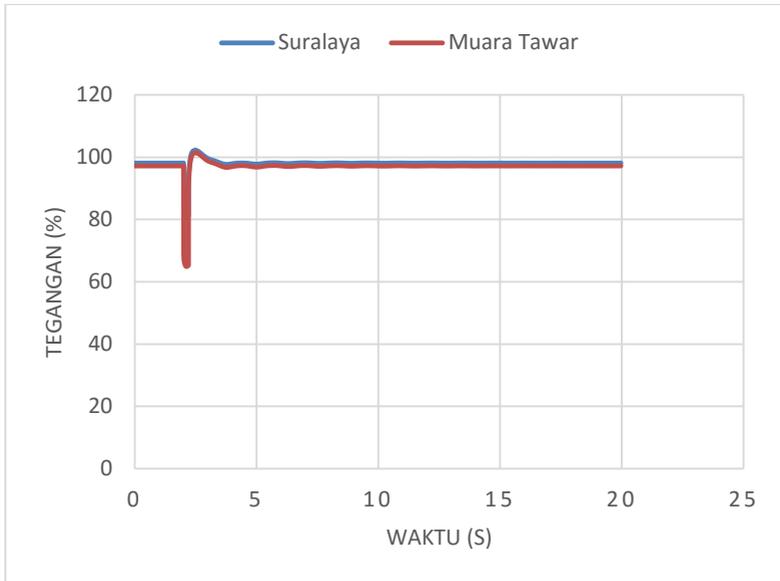
satu fasa dapat segera diamankan sistem. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil.



Gambar 4.21 Respon Sudut Rotor 6 generator ketika hubung singkat satu fasa ke tanah



Gambar 4.22 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat satu fasa ke tanah



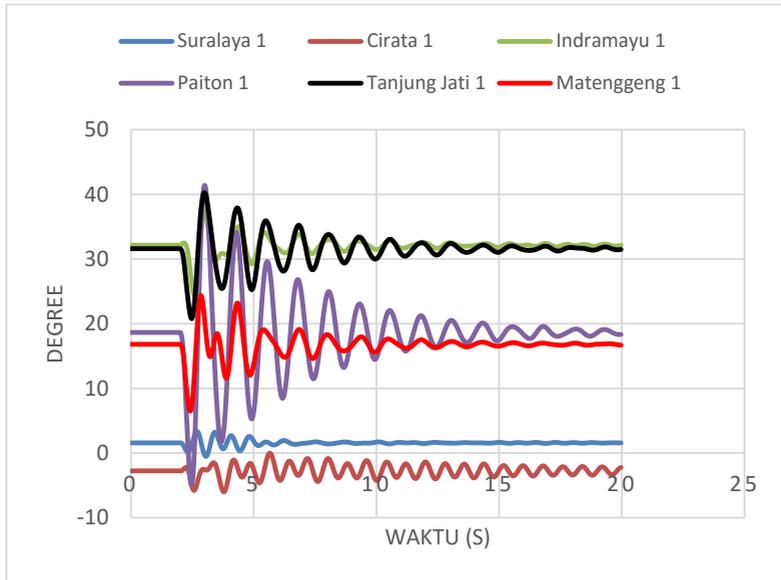
Gambar 4.23 Respon Tegangan bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat satu fasa ke tanah

Ketika terjadi hubung singkat 1 fasa ke tanah menyebabkan rpm atau putaran dari generator yang terhubung ke sistem akan berubah-ubah. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya fluktuasi nilai dari frekuensi sistem. Untuk kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus swing Suralaya dan bus terdekat dengan saluran yang terkena hubung singkat yaitu Muara Tawar. Dapat dilihat pada gambar 4.22 diketahui berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem masih dalam range yang aman, karena ketika terjadi gangguan frekuensi sistem terjadi osilasi meskipun nilainya cukup kecil dan frekuensi sistem atau bus dapat kembali ke nilai awal dan *steady state* pada 50 Hz.

Saat terjadi gangguan, respon tegangan di bus Suralaya maupun Muara Tawar mengalami drop tegangan yang cukup besar yang nilainya mencapai 80,63% untuk bus Suralaya dan 64,90% untuk bus Muara Tawar. Penurunan tersebut mengakibatkan terjadinya dip tegangan selama 0,2 sekon tetapi masih dalam standar *voltage sagging* SEMI F47. Respon ini akibat adanya suplai daya reaktif dari generator lain melalui

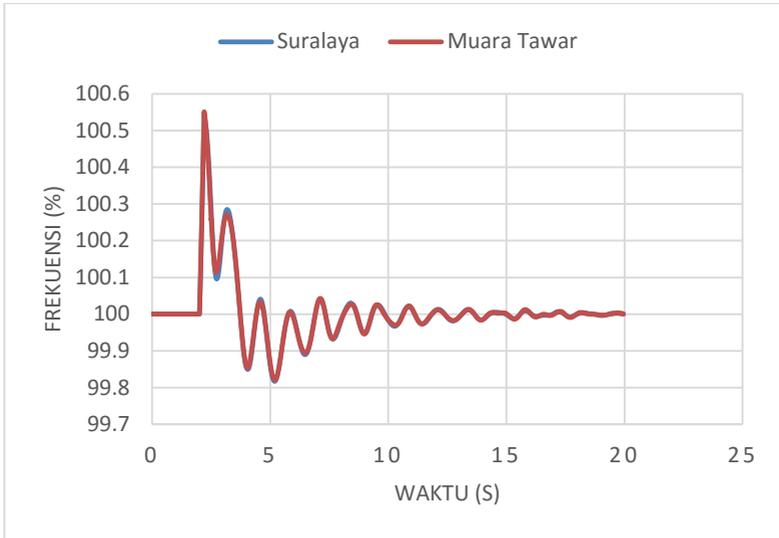
sistem interkoneksi. Pada kasus ini menurut standart PLN tegangan untuk nilai ketika *steady state* sistem 500 kV masih dalam batas aman.

- Kondisi operasi beban puncak

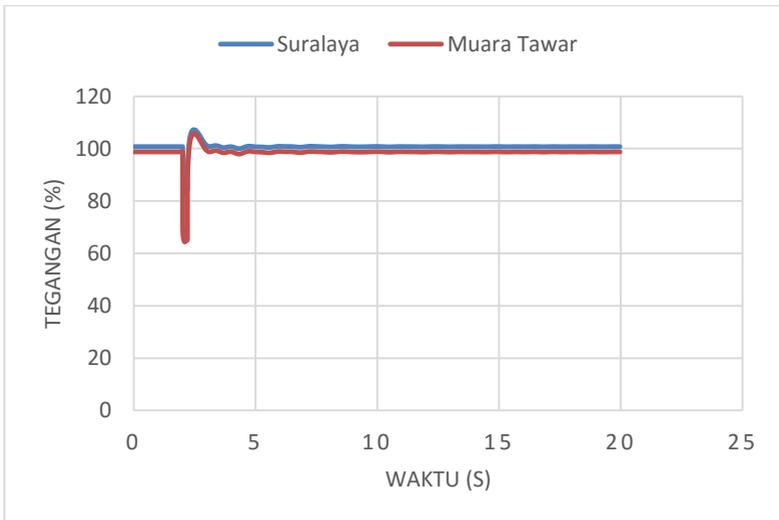


Gambar 4.24 Respon Sudut Rotor 6 generator ketika hubung singkat satu fasa ke tanah

Dapat dilihat pada gambar 4.24 ketika terjadi hubung singkat satu fasa ke tanah maka sudut rotor semua generator pada mengalami osilasi tetapi dapat kembali stabil atau *steady state*, seperti pada generator Suralaya 1 nilainya sempat mengalami osilasi tetapi bisa kembali *steady state* pada 1.57 *degree* dari 1.57 *degree*. Kemudian pada Cirata 1 nilainya mengalami osilasi tetapi bisa kembali *steady state* pada -2,25 *degree* dari -2,78 *degree*. Sedangkan generator Indramayu, Paiton, Tanjung Jati dan Matenggeng memiliki respon yang sama yaitu sempat mengalami osilasi tetapi dapat kembali *steady state*. Sudut rotor diatas mengalami osilasi dan bisa kembali ke titik stabil atau *steady state* disebabkan gangguan hubung singkat satu fasa yang terjadi bersifat sementara. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor generator dari sistem dapat kembali stabil.



Gambar 4.25 Respon Frekuensi bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat satu fasa ke tanah



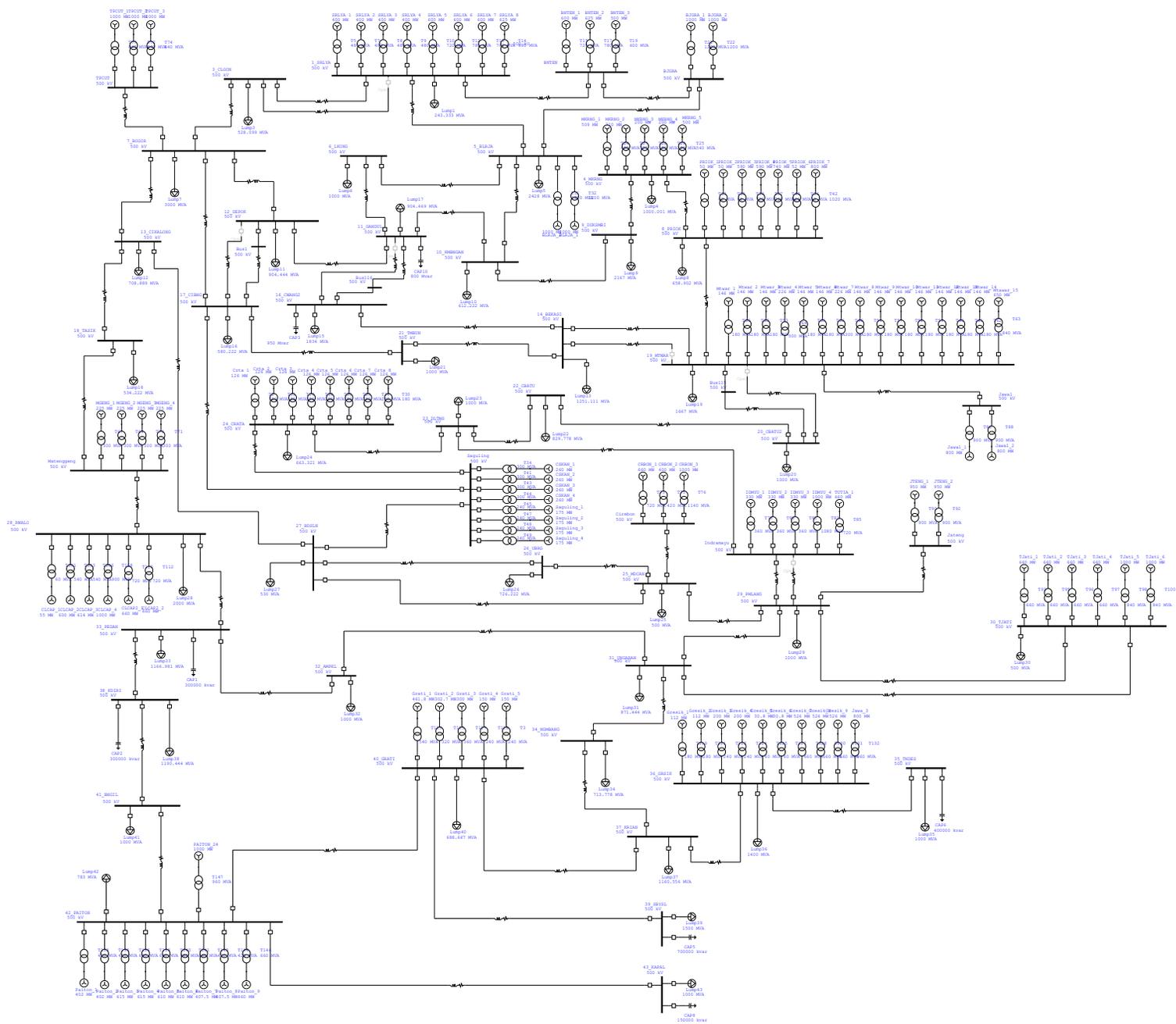
Gambar 4.26 Respon Tegangan bus Suralaya dan Muara Tawar ketika hubung singkat satu fasa ke tanah

Ketika terjadi hubung singkat 1 fasa ke tanah menyebabkan rpm atau putaran dari generator yang terhubung ke sistem akan berubah-ubah. Hal ini akan mengakibatkan terjadinya fluktuasi nilai dari frekuensi sistem. Untuk kasus ini parameter yang dilihat yaitu bus swing Suralaya dan bus terdekat dengan saluran yang terkena hubung singkat yaitu Muara Tawar. Dapat dilihat pada gambar 4.6 respon frekuensi antara bus Suralaya dengan bus Muara Tawar memiliki kesamaan ketika terjadi gangguan frekuensi sistem terjadi osilasi tetapi frekuensi sistem atau bus dapat kembali ke nilai awal dan *steady state* pada 50 Hz dan diketahui berdasarkan standart ANSI/IEEE C37.106-1987 frekuensi sistem masih dalam range yang aman.

Saat terjadi gangguan, respon tegangan di bus Suralaya maupun Muara Tawar mengalami drop tegangan yang cukup besar yang nilainya mencapai 82,59% untuk bus Suralaya dan 64,33% untuk bus Muara Tawar. Penurunan tersebut mengakibatkan terjadinya dip tegangan selama 0,2 sekon tetapi masih dalam standar *voltage sagging* SEMI F47. Respon ini akibat adanya suplai daya reaktif dari generator lain melalui sistem interkoneksi. Pada kasus ini menurut standart PLN tegangan untuk nilai ketika *steady state* sistem 500 kV masih dalam batas aman.

Halaman ini sengaja dikosongkan

One-Line Diagram - OLV1 (Transient Stability Analysis)



BAB 5

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil simulasi dan analisis, maka dalam Tugas Akhir ini dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- Untuk kasus Generator lepas dan saluran lepas, respon sudut rotor, frekuensi maupun tegangan sistem masih dalam batas kestabilan. Karena saat salah satu generator lepas, sistem Jawa-Madura-Bali hanya kehilangan 2% daya dari keseluruhan daya yang dibangkitkan pada sistem dan masih mencukupi kebutuhan daya beban.
- Untuk kasus *single pole auto reclosing* terjadi *voltage drop* terbesar saat hubung singkat satu fasa ke tanah di Bus Muara Tawar, yaitu mencapai 64,90% saat kondisi beban dasar dan 64,33% saat kondisi beban puncak dalam waktu 0,2 s. Tetapi kondisi tersebut dalam range batas aman sesuai standart *voltage sagging* SEMI F47.
- Untuk kasus *critical fault clearing time*, dengan hubung singkat tiga fasa pada bus Depok didapatkan waktu pemutusan yaitu 400 ms. Sedangkan pada bus Gandul didapatkan waktu pemutusan 400 ms. Kemudian pada bus Muara Tawar didapatkan waktu pemutusan 400 ms. Dengan standart batas pemutusan CB untuk sistem transmisi 500 kV adalah 80 ms maka dapat dikatakan sistem tetap stabil ketika terjadi hubung singkat tiga fasa ke tanah.

5.2 SARAN

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan setelah melakukan analisa adalah sebagai berikut :

- Untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dan akurat diperlukan data asli yang lebih lengkap. Meliputi data model generator, data governor, data exciter dan model beban secara rill.
- Untuk memperbaiki kestabilan dapat dilakukan *load shedding* / pelepasan beban tetapi perlu data yang lebih mendalam untuk beban yang dinilai penting atau tidak.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

1. Imam Robandi, Margo Pujiantara, “*Analisa Sistem Tenaga Modern [Pengantar stabilitas Dinamik]*” Proyek Percepatan Pendidikan Insinyur th 1996/1997 FTI ITS, 1997.
2. Kundur, P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, Inc, 1994.
3. Stevenson, W.D., Jr and John J. Grenger, “*Elements of Power System Analysis, 4th Edition*”. McGraw-Hill, Inc, 1994
4. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*” IEEE Transactions on Power system , vol. 19, no. 2, may 2004.
5. Saadat, H., “*Power System Analysis*”, McGraw-Hill, Inc, 1999.
6. Marsudi, Djiteng., “*Operasi Sistem Tenaga Listrik*”, Graha ilmu, Yogyakarta, 1994.
7. Penangsang, Ontoseno. “*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2*”, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
8. Azizah, Nurul,” *Analisis stabilitas transien pada sistem kelistrikan larantuka (NTT) akibat penambahan PLTU 2x4 M W tahun 2013*”. Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2010.
9. Tridianto, Erick, “ *Analisis stabilitas transien pada PT. Petrokimia Gresik akibat penambahan pembangkit 20&30 MW serta penambahan pabrik fosporit acid dan amonium urea*”, Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2010
10. Arifin, Fahrizal,” *Analisa stabilitas transien pada sistem kelistrikan PT.KALTIM Pasifik amoniak bontang akibat penambahan pembangkit 12.5 MW*”, Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2010

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Prima Prahasta Rezky, dilahirkan di kota Nganjuk, 24 Mei 1992. Penulis memulai jenjang pendidikannya di SDN Kauman 1 hingga lulus tahun 2005. Setelah itu penulis melanjutkan studinya di SLTP Negeri 1 Nganjuk dan lulus tahun 2008, penulis diterima sebagai murid SMA Negeri 1 Nganjuk hingga lulus tahun 2011. Pada tahun yang sama penulis masuk ke Jurusan D3 Teknik Elektro Industri Politeknik Elektronika Negeri Surabaya hingga lulus tahun 2014. Kemudian penulis melanjutkan

studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya lewat program Lintas Jalur mengambil jurusan Teknik Elektro dan bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi dia alamat email prezky6@gmail.com.