

TUGAS AKHIR - EE234899

**STUDI ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI SISTEM
JAWA-MADURA-BALI 500 KV AKIBAT PENAMBAHAN
PLTU SURALAYA UNIT 9-10 DENGAN KAPASITAS
2×1000 MW**

SUPRAYETNO

NRP 5022201258

Dosen Pembimbing

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

NIP. 1949201931101

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

NIP. 196404051990021001

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



TUGAS AKHIR - EE234899

**STUDI ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI SISTEM
JAWA-MADURA-BALI 500 KV AKIBAT PENAMBAHAN
PLTU SURALAYA UNIT 9-10 DENGAN KAPASITAS
2×1000 MW**

SUPRAYETNO

NRP 5022201258

Dosen Pembimbing

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

NIP. 1949201931101

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

NIP. 196404051990021001

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024



FINAL PROJECT - EE234899

**STUDY OF TRANSIENT STABILITY ANALYSIS IN THE
JAWA-MADURA-BALI 500 kV SYSTEM DUE TO THE
ADDITION OF THE SURALAYA PLTU UNITS 9-10
WITH A CAPACITY OF 2×1000 MW**

SUPRAYETNO

NRP 5022201258

Advisor

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

NIP. 1949201931101

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

NIP. 196404051990021001

Undergraduate Program of Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2024

LEMBAR PENGESAHAN

STUDI ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI SISTEM JAWA-MADURA-BALI 500 KV AKIBAT PENAMBAHAN PLTU SURALAYA UNIT 9-10 DENGAN KAPASITAS 2×1000 MW

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat
memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Program Studi Sarjana Teknik Elektro
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: SUPRAYETNO

NRP. 5022201258

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | |
|--|---------------|
| 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. | Pembimbing |
| 2. Prof. Dr. Ir Adi Soeprijanto, MT. | Ko-pembimbing |
| 3. Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T. | Penguji |
| 4. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D. | Penguji |
| 5. Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D. | Penguji |

SURABAYA

Juli, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

APPROVAL SHEET

STUDY OF TRANSIENT STABILITY ANALYSIS IN THE JAWA-MADURA-BALI 500 kV SYSTEM DUE TO THE ADDITION OF THE SURALAYA PLTU UNITS 9-10 WITH A CAPACITY OF 2×1000 MW

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a Bachelor of Engineering degree at
Undergraduated Study Program of Electrical Engineering
Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By : SUPRAYETNO

NRP. 5022201258

Approved by Final Project Examiner Team:

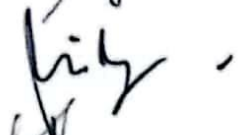
1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Advisor



2. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT.

Co-Advisor



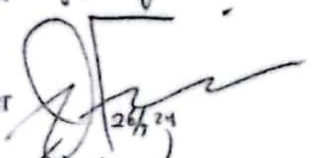
3. Dr. Ir. Ni Ketut Aryani, M.T.

Examiner



4. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.

Examiner



5. Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

Examiner



26/7/24

SURABAYA

July, 2024

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

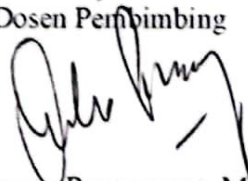
Nama mahasiswa / NRP : Suprayetno / 5022201258
Program studi : Teknik Elektro
Dosen Pembimbing / NIP : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. /
1949201931101
2. Prof. Dr. Ir Adi Soeprijanto, MT. /
196404051990021001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul "STUDI ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI SISTEM JAWA-MADURA-BALI 500 KV AKIBAT PENAMBAHAN PLTU SURALAYA UNIT 9-10 DENGAN KAPASITAS 2×1000 MW" adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 25 Juli 2024

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 1949201931101

Mahasiswa



Suprayetno
NRP. 5022201258

Halaman ini sengaja dikosongkan

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Suprayetno / 5022201258
Department : Electrical Engineering
Advisor / NIP : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. /
1949201931101
2. Prof. Dr. Ir Adi Soeprijanto, MT. /
196404051990021001

Hereby declare that the Final Project with the title of "STUDY OF TRANSIENT STABILITY ANALYSIS IN THE JAWA-MADURA-BALI 500 kV SYSTEM DUE TO THE ADDITION OF THE SURALAYA PLTU UNITS 9-10 WITH A CAPACITY OF 2×1000 MW" is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

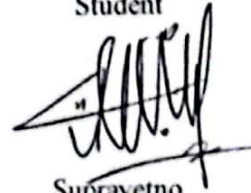
Surabaya, 25 July 2024

Acknowledged
Advisor



Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
NIP. 1949201931101

Student



Suprayetno
NRP. 5022201258

Halaman ini sengaja dikosongka

ABSTRAK

STUDI ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI SISTEM JAWA-MADURA-BALI 500 KV AKIBAT PENAMBAHAN PLTU SURALAYA UNIT 9-10 DENGAN KAPASITAS 2×1000 MW

Nama Mahasiswa / NRP : Suprayetno / 5022201258
Departemen : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

Abstrak

Pertumbuhan penduduk, perindustrian, dan ekonomi menyebabkan kebutuhan daya listrik bertambah. Menurut data statistik PT PLN Tahun 2022, rata – rata persentase kenaikan jumlah pelanggan per kelompok pelanggan dari tahun 2014 hingga tahun 2022 sebesar 5,27%. Untuk mengatasi hal tersebut, PT PLN (Persero) melakukan pembangunan pembangkit baru. Salah satu pembangkit yang saat ini masih dalam masa konstruksi yaitu PLTU Suralaya unit 9 dan 10 dengan kapasitas pembangkitan 2x1000 MW yang akan ditargetkan *Commercial Operation Date* masing – masing pada tahun 2025 dan 2026. Akibat adanya penambahan pembangkit baru di sistem kelistrikan Jawa Madura Bali, perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk mengetahui keandalan sistem saat terjadi gangguan. Pada tugas akhir ini terdapat 4 studi kasus gangguan yaitu lepas pembangkit, lepas satu saluran dari saluran ganda, lepas saluran ganda, dan hubung singkat 3 fasa. Studi kasus lepas pembangkit menunjukkan bahwa nadir frekuensi setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10 lebih kecil. Selain itu juga memberikan dampak positif dengan mengurangi osilasi dan mempercepat redaman osilasi menuju keadaan stabil. Pada studi kasus lepas satu saluran dari saluran ganda, sistem tetap stabil karena masih ada satu saluran yang dapat mentransmisikan daya. Respon tegangan bus pada studi kasus lepas saluran ganda menunjukkan osilasi yang lebih baik setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10, dengan penurunan tegangan dan stabil di range $\pm 5\%$. Namun, lepas saluran ganda (saluran Suralaya – Balaraja) menyebabkan *overload* pada saluran Bojonegara – Balaraja sebesar 135,8%, sehingga diperlukan penambahan saluran baru dari Banten – Balaraja untuk mengatasi *overload* tersebut. Pada studi kasus hubung singkat 3 fasa pada saluran Gandul – Depok, diperoleh nilai *critical clearing time* yang lebih baik setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10, yaitu 187 ms dibandingkan dengan 176 ms sebelum penambahan. Berdasarkan hasil simulasi stabilitas transien dengan mempertimbangkan respon sudut rotor, frekuensi, dan tegangan, diperoleh hasil bahwa setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10 sistem masih stabil untuk semua studi kasus gangguan yang dilakukan.

Kata kunci: Kestabilan Transien, Lepas Pembangkit, Lepas Saluran, Hubung Singkat 3 Fasa, *Critical Clearing Time*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

STUDY OF TRANSIENT STABILITY ANALYSIS IN THE JAWA-MADURA-BALI 500 kV SYSTEM DUE TO THE ADDITION OF THE SURALAYA PLTU UNITS 9-10 WITH A CAPACITY OF 2×1000 MW

Student Name / NRP : Suprayetno / 5022201258
Department : Electrical Engineering FTEIC - ITS
Advisor 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Advisor 2 : Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, M.T.

Abstract

Population growth, industrialization, and economic development have led to an increased demand for electricity. According to PLN's 2022 statistics, the average annual increase in the number of customers across all customer groups from 2014 to 2022 was 5.27%. To address this demand, PT. PLN (Persero) is constructing new power plants. One of the power plants currently under construction is the Suralaya power plant, which consists of units 9 and 10 with a total generation capacity of 2x1000 MW. These units are targeted for Commercial Operation Date in 2025 and 2026, respectively. Due to the addition of new power plants to the Java Madura Bali electrical system, a transient stability study is necessary to assess the system's reliability during disturbances. This final project includes four disturbance case studies: generator disconnection, single line disconnection from a double circuit, double line disconnection, and three-phase short circuits. The generator disconnection case study shows that the nadir frequency is smaller after the addition of Suralaya Units 9 and 10. Additionally, the addition of these units has a positive impact by reducing oscillations and accelerating the damping of oscillations to a stable state. In the single line disconnection from a double circuit case study, the system remains stable because there is still one line capable of transmitting power. The bus voltage response in the double line disconnection case study shows improved oscillations after the addition of Suralaya Units 9 and 10, with voltage drops remaining stable within the $\pm 5\%$ range. However, double line disconnection (Suralaya – Balaraja) causes an overload on the Bojonegara – Balaraja line by 135.8%, necessitating the addition of a new line from Banten – Balaraja to address the overload. In the three-phase short circuit case study on the Gandul – Depok line, the critical clearing time (CCT) is better after the addition of Suralaya Units 9 and 10, at 187 ms compared to 176 ms before the addition. Based on the transient stability simulation results considering rotor angle response, frequency, and voltage, the system remains stable for all disturbance case studies conducted after the addition of Suralaya Units 9 and 10.

Keywords: *Transient Stability, Generator Trip, Line Trip, Three-Phase Short Circuit, Critical Clearing Time.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

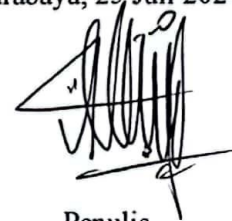
Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Analisis Kestabilan Transien di Sistem Jawa-Madura-Bali 500 kV Akibat Penambahan PLTU Suralaya Unit 9-10 dengan Kapasitas 2×1000 MW”. Laporan ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam proses penyusunan laporan ini, penulis memperoleh banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang senantiasa selalu memberikan motivasi, nasehat, dan doanya kepada penulis.
3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. dan Bapak Prof. Dr. Ir Adi Soeprijanto, MT., selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, saran, serta dukungan yang tiada henti sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen di Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan ilmu pengetahuan, kritik, dan saran yang berharga selama masa studi.
5. Teman-teman angkatan e60 (2020) Teknik Elektro yang telah bersama-sama menjalani perkuliahan selama kurang lebih 4 tahun ini.
6. Teman – teman satu kos yakni Satya dan Anamta yang selalu memberikan dukungan dan informasi selama pengerjaan Tugas Akhir.
7. Alam, Rio, Muchsin, dan teman – teman kontrakan B027A yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan hiburan dalam pengerjaan Tugas Akhir.
8. Teman-teman seperjuangan TA PSSSL yang sudah memberikan bantuan dan semangat kepada penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
9. Semua pihak yang telah membantu penulis yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis berharap mendapatkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan di masa mendatang. Besar harapan penulis dalam Tugas Akhir ini bisa memberikan masukan dan manfaat bagi pembaca. Terima kasih

Surabaya, 25 Juli 2024



Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
APPROVAL SHEET	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS	v
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SIMBOL	xx
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah	1
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Manfaat.....	2
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	3
2.2 Dasar Teori	4
2.2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik.....	4
2.2.2 Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	4
2.2.3 Kriteria Desain dan Pengoperasian untuk Stabilitas	10
2.2.4 Persamaan Ayunan	11
2.2.5 Stabilitas Transien	14
2.2.6 Konsep Dasar Hubung Singkat	17
2.2.7 <i>Critical Clearing Time</i>	20
2.2.8 Standar yang Digunakan Untuk Studi Analisis Kestabilan Transien.....	21
BAB 3 METODOLOGI	25
3.1 Metode yang Digunakan.....	25
3.2 Bahan dan Peralatan yang Digunakan	25

3.2.1	Sistem Kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV	25
3.2.2	Data Saluran Transmisi Jawa Madura Bali 500 kV	26
3.2.3	Data Pembangkitan Jawa Madura Bali 500 kV	28
3.2.4	Data Beban Jawa Madura Bali 500 kV	31
3.3	Urutan Pelaksanaan Penelitian	32
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1	Studi Kasus Kestabilan Transien.....	35
4.1.1	Aliran Daya Saluran Transmisi Jawa Madura Bali 500 kV	36
4.1.2	Hubung Singkat 3 Fasa	36
4.2	Simulasi Studi Kasus Kestabilan Transien.....	37
4.2.1	Studi Kasus 1 : Lepas Pembangkit.....	37
4.2.2	Studi Kasus 2 : Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda.....	40
4.2.3	Studi Kasus 3 : Lepas Saluran Ganda	44
4.2.4	Studi Kasus 4 : Hubung Singkat 3 Fasa	47
4.3	Analisis Hasil Simulasi.....	53
4.3.1	Analisis Hasil Studi Kasus 1 : Lepas Pembangkit	53
4.3.2	Analisis Hasil Studi Kasus 2 : Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda	55
4.3.3	Analisis Hasil Studi Kasus 3 : Lepas Saluran Ganda.....	57
4.3.4	Analisis Hasil Studi Kasus 4 : Hubung Singkat 3 Fasa.....	61
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	63
4.4	Kesimpulan.....	63
4.5	Saran	63
	DAFTAR PUSTAKA.....	65
	LAMPIRAN.....	67
	BIODATA PENULIS.....	77

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	4
Gambar 2.2 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Sederhana.....	5
Gambar 2.3 Model Ideal	6
Gambar 2.4 Diagram Fasor	6
Gambar 2.5 Kurva Sudut Daya	7
Gambar 2.6 Sistem Radial Sederhana untuk Ilustrasi Fenomena Stabilitas Tegangan	8
Gambar 2.7 SMIB dengan Gangguan Terjadi di Saluran	14
Gambar 2.8 Kurva <i>Equal Area Criterion</i>	15
Gambar 2.9 Rangkaian Ekuivalen SMIB Sebelum Gangguan	15
Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen SMIB Saat Gangguan	15
Gambar 2.11 Rangkaian Ekuivalen SMIB Sesudah Gangguan	16
Gambar 2.12 Kurva Hubungan P dan δ	17
Gambar 2.13 Fasor Tidak Seimbang (Asimetri).....	19
Gambar 2.14 Gangguan Satu Fasa ke Tanah	19
Gambar 2.15 Gangguan Dua Fasa ke Tanah.....	20
Gambar 2.16 Gangguan Antar Fasa (L-L)	20
Gambar 2.17 Batas Operasi Frekuensi Abnormal untuk <i>Steam Turbine</i>	21
Gambar 2.18 Standar Tegangan IEEE Std 1159-1995, Karakteristik <i>Voltage Sag</i>	23
Gambar 3.1 <i>Single Line Diagram</i> (SLD) Sistem Jawa Madura Bali 500 kV	25
Gambar 3.2 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir	32
Gambar 4.1 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Pembangkit Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	37
Gambar 4.2 Respon Frekuensi Ketika Lepas Pembangkit Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	38
Gambar 4.3 Respon Tegangan Ketika Lepas Pembangkit Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	38
Gambar 4.4 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Pembangkit Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	39
Gambar 4.5 Respon Frekuensi Ketika Lepas Pembangkit Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	39
Gambar 4.6 Respon Tegangan Ketika Lepas Pembangkit Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	40
Gambar 4.7 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10.....	41
Gambar 4.8 Respon Frekuensi Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10.....	41
Gambar 4.9 Respon Tegangan Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10.....	42
Gambar 4.10 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10.....	42
Gambar 4.11 Respon Frekuensi Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10.....	43

Gambar 4.12	Respon Tegangan Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10.....	43
Gambar 4.13	Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	44
Gambar 4.14	Respon Frekuensi Ketika Lepas Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	44
Gambar 4.15	Respon Tegangan Ketika Lepas Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	45
Gambar 4.16	Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	45
Gambar 4.17	Respon Frekuensi Ketika Lepas Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	46
Gambar 4.18	Respon Tegangan Ketika Lepas Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	46
Gambar 4.19	Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,282 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	47
Gambar 4.20	Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,281 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	48
Gambar 4.21	Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,282 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	48
Gambar 4.22	Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,281 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	49
Gambar 4.23	Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,176 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	49
Gambar 4.24	Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,176 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	50
Gambar 4.25	Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,291 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	50
Gambar 4.26	Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,290 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	51
Gambar 4.27	Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,291 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	51
Gambar 4.28	Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,290 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	52
Gambar 4.29	Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,187 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	52
Gambar 4.30	Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,187 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	53
Gambar 4.31	Respon Sistem ketika Studi Kasus Lepas Pembangkit	54
Gambar 4.32	Respon Sistem ketika Studi Kasus Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda.	56
Gambar 4.33	Respon Sistem Ketika Studi Kasus Lepas Saluran Ganda.....	58

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konversi Standar Frekuensi 60 Hz ke 50 Hz untuk <i>Underfrequency Limit</i>	22
Tabel 2.2 Konversi Standar Frekuensi 60 Hz ke 50 Hz untuk <i>Overfrequency Limit</i>	22
Tabel 2.3 Batas rentang Frekuensi Operasi	22
Tabel 2.4 Standar Tegangan IEEE Std 1159-1995	23
Tabel 2.5 Batas Rentang Variasi Tegangan	24
Tabel 2.6 Batas Tegangan Maksimum.....	24
Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi Jawa Madura Bali 500 kV	26
Tabel 3.2 Data Pembangkitan Generator Jawa Madura Bali 500 kV	28
Tabel 3.3 Data Beban Jawa Madura Bali 500 kV	31
Tabel 4.1 Rincian Studi Kasus Kestabilan Transien Sistem Jawa Madura Bali 500 kV ...	35
Tabel 4.2 Data <i>Loadflow</i> 5 Saluran dengan Aliran Daya Terbesar Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	36
Tabel 4.3 Lima Bus dengan Arus Hubung Singkat 3 Fasa Terbesar Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10	36
Tabel 4.4 Arus Kontribusi Hubung Singkat 3 Fasa di Bus Gandul	37
Tabel 4.5 <i>Overload</i> Saluran Bojonegara – Balaraja	60
Tabel 4.6 Data Konduktor Saluran Baru Banten – Balaraja yang Digunakan.....	61
Tabel 4.7 Pembebanan Saluran Transmisi Setelah Penambahan Saluran Banten - Balaraja Saat Kasus Lepas Saluran Ganda Saluraja – Balaraja.....	61
Tabel 4.8 Nilai CCT Sebelum dan Sesudah Penambahan PLTU Suralaya Unit 9&10	62

DAFTAR SIMBOL

Φ_{air} = fluks celah udara

p = jumlah kutub generator

F_r = magnetomotive force (MMF) medan rotor atau gaya gerak magnet

T_m = torsi mekanikal dihasilkan dari *prime mover*

T_e = torsi elektromagnetik yang menyumbang daya output generator

T_a = total percepatan torsi

J = massa rotor dengan total momen inersia

θ_m = perpindahan sudut rotor relatif terhadap sumbu yang diam

ω_{sm} = kecepatan sinkron generator

δ_m = posisi sudut rotor relative terhadap sumbu yang berputar secara sinkron

t = waktu

ω_m = kecepatan sudut rotor

P_m = daya mekanis turbin

P_e = daya elektrik atau daya output generator

M = momentum sudut rotor pada kecepatan sinkron atau momen inersia konstan

H = konstanta inersia

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Listrik menjadi kebutuhan yang sangat penting bagi masyarakat dan industri. Pertumbuhan penduduk, perindustrian, dan ekonomi menyebabkan kebutuhan daya listrik bertambah. Menurut data statistik PT PLN Tahun 2022, rata-rata persentase kenaikan jumlah pelanggan per kelompok pelanggan dari tahun 2014 hingga tahun 2022 sebesar 5,27%. Untuk daya yang tersambung per kelompok pelanggan (MVA) di Pulau Jawa pada tahun 2022 sebesar 106.161,62 MVA setara dengan 65,59% dari total daya tersambung per kelompok pelanggan di Indonesia. Sedangkan rata-rata persentase kapasitas terpasang (MW) di Indonesia dari tahun 2014 hingga tahun 2022 sebesar 4,13%, dengan jumlah kapasitas yang terpasang di Pulau Jawa pada tahun 2022 sebesar 45.835,45 MW setara dengan 66,39% dari total kapasitas yang terpasang di Indonesia [1].

Untuk mengatasi permintaan energi listrik yang terus meningkat, PT PLN (Persero) melakukan pembangunan pembangkit baru untuk meningkatkan kapasitas pembangkit sistem Jawa Madura Bali. PT PLN (Persero) membangun 2 unit PLTU di Suralaya yaitu unit 9 dan 10 dengan kapasitas pembangkitan 2x1000 MW. Sesuai dengan RUPTL PT. PLN 2021-2030, PLTU Suralaya unit 9 dan 10 di targetkan Commercial Operation Date (COD) masing-masing pada tahun 2025 dan 2026 [2]. Nantinya listrik yang dihasilkan PLTU Suralaya unit 9 dan 10 disalurkan ke jalur transmisi 500 kV Sistem Jawa Madura Bali.

Beban yang terus meningkat setiap tahunnya membuat sistem kelistrikan yang ada harus beroperasi mendekati batas kestabilan. Akibat adanya penambahan pembangkit baru pada sistem kelistrikan Jawa Madura Bali, perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk mengetahui keandalan sistem saat terjadi gangguan. Kestabilan/Stabilitas adalah sifat suatu sistem tenaga untuk menghasilkan gaya pemulih yang sebanding atau lebih besar dari gaya pengganggu guna menjaga keseimbangan. Pada umumnya, stabilitas dibagi menjadi 2 yaitu stabilitas tunak dan stabilitas transien. Pada penelitian tugas akhir ini akan membahas tentang kestabilan transien yang berkaitan dengan dampak gangguan besar dan tiba-tiba seperti terjadinya gangguan hubung singkat, pemadaman saluran secara tiba-tiba, pelepasan beban, dan generator trip. Studi stabilitas transien dilakukan untuk memastikan sistem dapat bertahan setelah terjadi gangguan yang tiba-tiba (transien). Oleh sebab itu, analisis tersebut dianggap perlu untuk mengkaji ulang dan menentukan hal-hal penting seperti kemampuan transfer antar sistem di sistem kelistrikan Jawa Madura Bali kedepannya [3].

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian tugas akhir ini yaitu:

1. Bagaimana analisis kestabilan transien di sistem Jawa Madura Bali 500 kV akibat penambahan unit baru PLTU Suralaya unit 9 dan 10 dengan kapasitas 2x1000 MW dengan memperhatikan respon sudut rotor, respon frekuensi, dan respon tegangan?
2. Bagaimana menentukan waktu *Critical Clearing Time* (CCT) ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada sistem kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian tugas akhir ini yaitu:

1. Simulasi dan analisis dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP 19.0.1.

2. Sistem yang digunakan adalah sistem kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV Tahun 2026 berdasarkan RUPTL PLN 2021-2026.
3. Studi kasus gangguan yang akan disimulasikan yaitu lepas pembangkit, lepas satu saluran dari saluran ganda, lepas saluran ganda, dan hubung singkat 3 fasa.
4. Simulasi kestabilan transien hanya melihat respon sudut rotor, frekuensi, dan tegangan.
5. Penentuan nilai *critical clearing time* menggunakan metode *time domain simulation*.

1.4 Tujuan

Tujuan pada tugas akhir ini yaitu:

1. Mengetahui kestabilan sistem akibat gangguan transien yang terjadi di sistem Jawa Madura Bali 500 kV akibat penambahan PLTU Suralaya Unit 9 dan 10 dengan melihat respon sudut rotor, respon frekuensi, dan respon tegangan.
2. Mengetahui waktu *Critical Clearing Time* (CCT) ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa agar sistem Jawa Madura Bali 500 kV tetap stabil.

1.5 Manfaat

Manfaat dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat kepada para pembaca dan sebagai referensi bagi penelitian selanjutnya terkait studi analisis kestabilan transien di sistem kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Studi analisis kestabilan transien telah beberapa kali menjadi topik tugas akhir. Penulis menjadikan berbagai sumber referensi untuk melakukan analisis mendalam terhadap kestabilan transien.

Dalam penelitian sebelumnya [4], dengan judul “Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban Akibat Penambahan Pembangkit 1x26,8 MW Pada Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik” dilakukan analisis stabilitas transien dikarenakan ada penambahan pembangkit dengan kapasitas 26,8 MW. Hasil dari penelitian ini didapatkan dari 8 kasus lepasnya pembangkit, 6 diantaranya dapat menyebabkan kondisi sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik berbahaya karena respon frekuensi, respon tegangan, dan respon sudut rotor diatas standar. Pada kasus hubung singkat SC 0,4 kV dan SC 6 kV sistem masih stabil, sedangkan kasus hubung singkat SC 20 kV menyebabkan pabrik 3B terpisah dari sistem keseluruhan. Dan dalam kasus starting motor masih cukup handal, dengan penyalaan motor 1670 kW secara direct saat 3 generator dalam keadaan aktif masih diizinkan.

Dalam penelitian sebelumnya [5], dengan judul “Studi Analisa Stabilitas Transien Sistem Jawa Madura Bali 500kV Setelah Masuknya Pembangkit Paiton 1000 MW Pada Tahun 2021” didapatkan hasil bahwa respon sudut rotor, respon tegangan, dan respon frekuensi saat salah satu generator lepas masih dalam batas kestabilan. Untuk kasus *single pole auto reclosing* hubung singkat satu fasa ke tanah, terjadi drop tegangan di bus Muara Tawar sebesar 64,9% saat beban dasar dan 64,33% saat beban puncak dalam waktu 0,2 detik. Kasus *critical fault clearing time* dengan hubung singkat tiga fasa ke tanah pada bus Depok, bus Gandul, dan bus Muara Tawar didapatkan waktu pemutusan ketiga bus tersebut yaitu 400 ms.

Dalam penelitian sebelumnya [6], dengan judul “Transient Stability Analysis to Determine CCT Due to Increased Load and Addition of Transmission Lines in Malang Raya Interconnection System” studi ini menyajikan analisis stabilitas transien untuk menentukan nilai waktu pemutusan kritis (CCT). Dilakukan pengujian satbilas transien sistem interkoneksi 150 kV Malang untuk menentukan waktu pemutusan kritis akibat gangguan 3 fasa. Waktu pemutusan kritis adalah waktu penentu apakah sistem kembali ke keadaan stabil atau tidak. Penentuan nilai CCT dapat diperoleh dengan menggunakan metode Runge-Kutta Orde 4. Dalam hasil perhitungan, nilai CCT terkecil adalah 0,410 detik ketika terjadi kesalahan pada bus Pakis-Infinite yang dekat dengan bus Pakis dengan nilai sudut pemutusan kritis dalam kisaran $16,808^\circ$ hingga $16,910^\circ$ untuk generator Wlingi dan $46,970^\circ$ hingga $47,183^\circ$ untuk generator Sutami.

Dalam penelitian sebelumnya [7], dengan judul “Analisis Stabilitas Transien pada PT. Petrokimia Gresik Akibat Penambahan Pembangkit 20 & 30 MW serta Penambahan Pabrik Phosporit Acid dan Amunium Urea” diperoleh hasil penelitian yaitu didapatkan dari 7 kasus gangguan akibat lepasnya pembangkit mengakibatkan 4 kasus kekurangan *spinning reserve*, 1 kasus *undervoltage*, dan 4 kasus *underfrequency*. Sedangkan saat terjadi hubung singkat dan bersamaan CB PLN *open* terjadi *underfrequency* pada sistem. Oleh sebab itu dilakukan pelepasan beban dan pemasangan kapasitor bank.

2.2 Dasar Teori

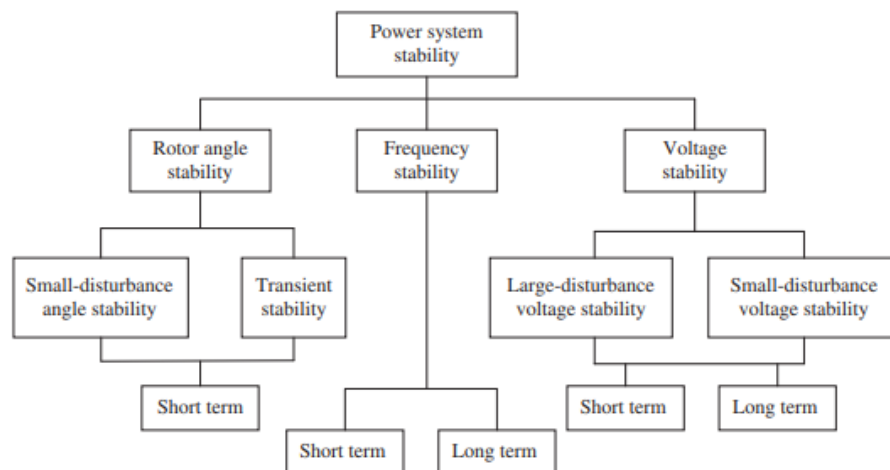
2.2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah sistem nonlinier yang beroperasi dengan perubahan waktu yang signifikan. Ketika mengalami gangguan, stabilitas sistem bergantung pada dua faktor yaitu kondisi pengoperasian awal dan tingkat keparahan gangguan. Kondisi operasi dan tingkat keparahan gangguan dapat mempengaruhi perilaku stabilitas sistem. Analisis stabilitas perlu dilakukan pemeriksaan apakah sistem tenaga listrik mencapai keadaan keseimbangan baru dengan integritas sistem tetap terjaga setelah terjadi gangguan. Kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menjaga stabilitasnya setelah mengalami gangguan merupakan aspek yang sangat penting.

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik pada kondisi operasi awal tertentu untuk mendapatkan kembali keadaan keseimbangan operasi setelah mengalami gangguan [8]. Pada saat sistem tenaga listrik berada dalam keadaan operasi yang stabil, terdapat keseimbangan antara daya input mekanis yang diterapkan pada *prime mover* dengan daya output listrik yang disalurkan ke beban listrik dalam sistem. Pada kondisi operasi normal dimana semua generator berputar pada kecepatan sinkron, terjadi keseimbangan antara daya input mekanis pada *prime mover* dan daya output listrik yang disalurkan ke beban listrik. Namun, ketika terjadi gangguan, terjadi perbedaan signifikan antara daya input mekanis dan daya output listrik dari generator. Kelebihan daya mekanis dibandingkan daya listrik dapat menyebabkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya. Jika gangguan tidak segera diatasi, perubahan kecepatan putaran rotor generator dapat mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem.

2.2.2 Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Besarnya ukuran dan kompleksitas permasalahan stabilitas, dapat dilakukan penyederhanaan untuk menganalisis jenis permasalahan/gangguan yang terjadi. Analisis stabilitas sistem mencakup beberapa faktor utama yang mempengaruhi stabilitas, yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan [8].



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

2.2.2.1 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor adalah kemampuan mesin sinkron yang saling berhubungan dalam suatu sistem tenaga untuk tetap sinkron pada kondisi operasi normal dan mendapatkan kembali

sinkronisme setelah mengalami gangguan kecil atau besar [9]. Suatu mesin tetap sinkron jika torsi elektromagnetik sama dan berlawanan dengan torsi mekanis yang dihasilkan oleh penggerak mula. Oleh karena itu, jenis stabilitas ini bergantung pada kemampuan mesin sinkron untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara dua torsi yang berlawanan.

Mesin sinkron tetap sinkron setelah terjadi gangguan ketika keseimbangan antara torsi elektromagnetik keluaran dan torsi mekanis masukan dapat dipulihkan/dipertahankan. Ketika keseimbangan ini hilang, ketidakstabilan memanifestasikan dirinya sebagai peningkatan atau penurunan ayunan sudut generator, yang mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dengan generator lain yang saling berhubungan. Persamaan torsi mendefinisikan hubungan antara torsi mekanis poros, tegangan stator, eksitasi sistem dan sudut rotor. Perubahan salah satu darinya akan mengakibatkan sudut rotor berada pada posisi yang baru dengan sendirinya.

$$T_m = \frac{\pi p^2}{8} \Phi_{air} F_r \sin \delta \quad 2.1$$

Keterangan:

T_m adalah torsi mekanis poros

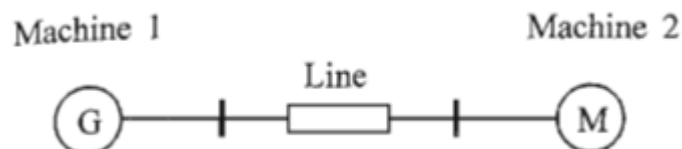
p adalah jumlah kutub

Φ_{air} adalah fluks di celah udara

F_r adalah MMF medan rotor

δ adalah sudut daya (rotor)

Salah satu karakteristik penting yang mempengaruhi stabilitas sistem tenaga listrik adalah hubungan antara daya yang ditransfer dan posisi sudut rotor mesin sinkron. Untuk menggambarkan hal ini, dapat dilihat pada sistem sederhana yang ditunjukkan pada gambar 4.2 [10].

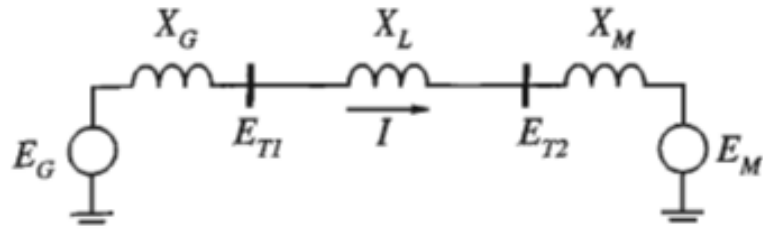


Gambar 2.2 *Single Line Diagram* Sistem Sederhana

Sistem diatas terdiri dari dua mesin sinkron yang dihubungkan oleh saluran transmisi dengan reaktansi induktif X_L serta resistansi dan kapasitansi yang dapat diabaikan. Pada gambar 4.2, Mesin 1 berfungsi sebagai generator yang mengirimkan daya ke motor sinkron (mesin 2).

Daya yang ditransfer dari generator ke motor tergantung pada pemisahan sudut (δ) antara rotor kedua mesin. Pemisahan sudut ini terdiri dari tiga komponen, yaitu:

1. Sudut internal generator (δ_G), yaitu sudut di mana rotor generator mendahului medan putar stator.
2. Sudut antara tegangan terminal generator dan motor (δ_L), yang menunjukkan sudut di mana medan stator generator mendahului medan motor.
3. Sudut internal motor (δ_M), yaitu sudut di mana rotor motor tertinggal dari medan putar stator



Gambar 2.3 Model Ideal

Pada gambar 2.3 menampilkan model sistem yang dapat digunakan untuk menentukan hubungan antara daya dan sudut.

Keterangan :

E_G adalah tegangan internal generator

E_{T1} adalah tegangan saluran (bus 1)

E_{T2} adalah tegangan saluran (bus 2)

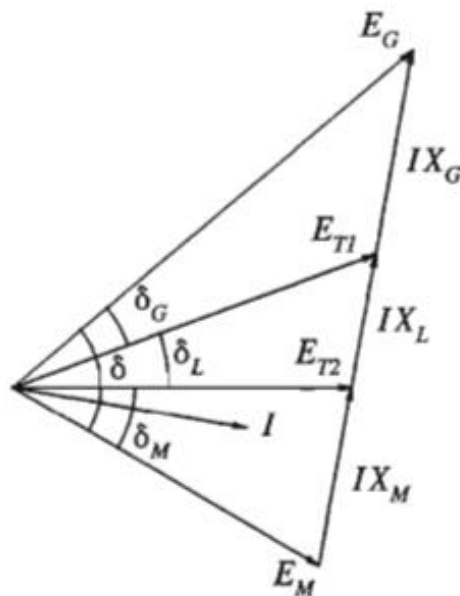
E_M adalah tegangan internal motor

X_G adalah reaktansi internal generator

X_L adalah reaktansi saluran

X_M adalah reaktansi internal motor

Hubungan antara daya dan sudut dapat direpresentasikan oleh gambar dibawah ini.



Gambar 2.4 Diagram Fasor

Pada gambar 2.4 transfer daya dari generator ke motor dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

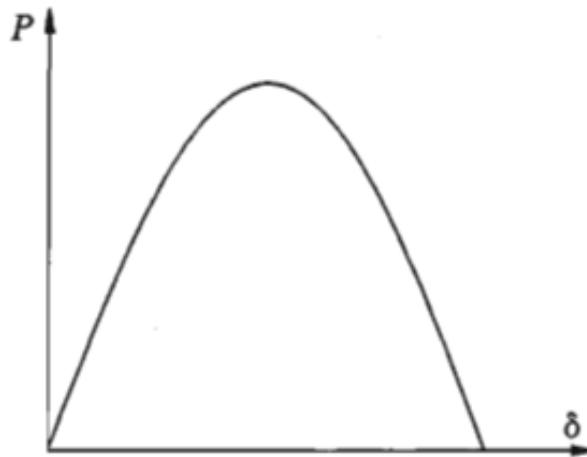
$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad 2.2$$

Dengan

$$X_T = X_G + X_L + X_M$$

2.3

Maka, hubungan antara daya dan sudut dapat digambarkan sebagai berikut.



Gambar 2.5 Kurva Sudut Daya

Dari gambar 2.5, saat sudut meningkat maka transfer daya juga meningkat hingga mencapai puncaknya. Setelah sudut mencapai 90 derajat, peningkatan sudut lebih lanjut mengakibatkan penurunan daya yang ditransfer. Oleh karena itu, terdapat batas maksimum daya dalam keadaan *steady state* yang dapat ditransmisikan antara kedua mesin. Besarnya daya maksimum ini berbanding lurus dengan tegangan internal mesin dan berbanding terbalik dengan reaktansi antara tegangan, yang mencakup reaktansi saluran transmisi yang menghubungkan mesin dan reaktansi mesin.

2.2.2.2 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi merujuk pada kemampuan sistem untuk menjaga frekuensi pada keadaan *steady state* setelah terjadi gangguan. Kemampuan ini tergantung pada kemampuan sistem untuk menjaga atau mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan dan pembebanan setelah terjadinya kehilangan beban. Umumnya, kendala dalam kestabilan frekuensi dapat dikaitkan dengan kurangnya respon peralatan, kurangnya koordinasi antar peralatan kontrol dan frekuensi, atau kekurangan daya cadangan pembangkitan (*spinning reserve*) [5].

Stabilitas frekuensi dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yakni jangka panjang dan jangka pendek. Stabilitas frekuensi jangka pendek adalah terjadinya perubahan beban yang besar sehingga generator tidak mampu untuk memenuhi kebutuhan daya pada sistem. Di sisi lain, stabilitas frekuensi jangka panjang sering kali terkait dengan masalah kontrol governor yang tidak berfungsi selama gangguan, dengan rentang waktu fenomena ini berkisar antara puluhan detik hingga beberapa menit.

Beban sistem yang berupa daya aktif maupun daya reaktif selalu berubah sepanjang waktu, maka untuk mempertahankan frekuensi dalam batas toleransi yang diperbolehkan, pembangkitan daya aktif dalam sistem harus disesuaikan dengan beban daya aktif. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator.

$$(T_G - T_B) = H \times d\omega/dt \quad 2.4$$

$$f = \omega/2\pi \quad 2.5$$

Keterangan :

T_G adalah kopel penggerak generator

T_B adalah kopel beban yang membebani generator

H adalah momen inersia dari generator beserta mesin penggeraknya

ω adalah kecepatan sudut perputaran generator ($2\pi f$)

f adalah frekuensi

Pengaturan frekuensi dalam sistem berarti pula mengatur kopel penggerak generator atau juga pengaturan daya aktif dari generator.

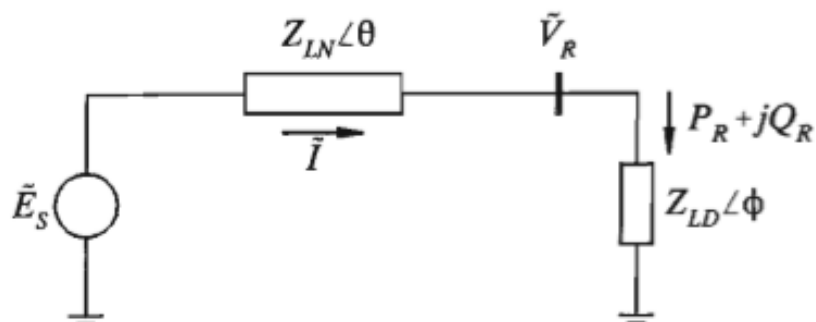
$$T_G - T_B = \Delta T < 0, \text{ maka } d\omega/dt < 0, \text{ frekuensi turun} \quad 2.6$$

$$T_G - T_B = \Delta T > 0, \text{ maka } d\omega/dt > 0, \text{ frekuensi naik} \quad 2.7$$

2.2.2.3 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan tegangan tetap pada semua bus dalam sistem setelah mengalami gangguan. Mirip dengan stabilitas sudut rotor, stabilitas tegangan dikaitkan dengan kemampuan untuk menjaga keseimbangan antara suplai beban dan kebutuhan beban dalam sistem [8]. Gangguan umumnya terjadi akibat pelepasan beban secara mendadak atau kehilangan sinkronisasi dari salah satu pembangkit, yang dapat menyebabkan penurunan tegangan secara signifikan. Stabilitas tegangan melibatkan masalah gangguan baik yang berskala besar maupun kecil, baik dalam jangka waktu pendek maupun panjang. Ketidakstabilan dapat mencakup peningkatan atau penurunan nilai tegangan pada beberapa bus. Penyebab utama ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan sistem untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif beban [11].

Ketidakstabilan tegangan dapat terjadi dalam berbagai cara. Dalam bentuk sederhana, hal ini dapat diilustrasikan dengan mempertimbangkan dua terminal seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Sistem ini terdiri dari sumber tegangan konstan (E_s) yang memasok beban (Z_{LD}) melalui impedansi seri (Z_{LN}). Ini adalah representasi dari suplai radial sederhana ke beban atau area beban yang dilayani oleh sistem besar melalui saluran transmisi [10].



Gambar 2.6 Sistem Radial Sederhana untuk Ilustrasi Fenomena Stabilitas Tegangan

Persamaan untuk arus dari gambar 2.6 adalah

$$I = \frac{E_s}{Z_{LN} \angle \theta + Z_{LD} \angle \phi} \quad 2.8$$

Dimana I dan E_S merupakan phasor, dan besar arus dapat dinyatakan sebagai berikut

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_{LN}\cos\theta + Z_{LD}\cos\varphi)^2 + (Z_{LN}\sin\theta + Z_{LD}\sin\varphi)^2}} \quad 2.9$$

Permasalahan diatas dapat dinyatakan juga sebagai berikut

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_S}{Z_{LN}} \quad 2.10$$

Dengan

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}}\right) \cos(\theta - \varphi) \quad 2.11$$

Maka, besar tegangan di sisi penerima yaitu

$$V_R = Z_{LD} I \quad 2.12$$

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S \quad 2.13$$

Daya yang disuplai ke beban adalah

$$P_R = V_R I \cos\varphi \quad 2.14$$

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}}\right)^2 \cos\varphi \quad 2.15$$

Untuk keperluan analisis, stabilitas tegangan dapat diklasifikasikan ke dalam dua subkelas, yaitu sebagai berikut [10]:

a. Stabilitas Tegangan Gangguan Besar (*Large-Disturbance Voltage Stability*)

Stabilitas tegangan gangguan besar berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengendalikan tegangan setelah gangguan besar seperti kesalahan sistem, hilangnya pembangkitan, atau kontingensi sirkuit. Periode studi yang relevan dapat berkisar dari beberapa detik hingga puluhan menit. Oleh karena itu, simulasi dinamis jangka panjang diperlukan untuk analisis. Kriteria untuk stabilitas tegangan gangguan besar adalah bahwa, setelah gangguan tertentu dan tindakan kontrol sistem, tegangan di semua bus mencapai tingkat keadaan *steady state* yang dapat diterima.

b. Stabilitas Tegangan Gangguan Kecil (*Small-Disturbance Voltage Stability*)

Stabilitas tegangan gangguan kecil berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengendalikan tegangan setelah gangguan kecil seperti perubahan incremental pada beban sistem. Proses dasar yang berkontribusi pada ketidakstabilan tegangan gangguan kecil pada dasarnya bersifat keadaan tunak. Oleh karena itu, analisis statik dapat digunakan secara efektif untuk menentukan margin stabilitas, mengidentifikasi faktor – faktor yang mempengaruhi stabilitas, dan memeriksa berbagai kondisi sistem serta sejumlah besar skenario pasca-kontingensi.

Kriteria untuk stabilitas tegangan gangguan kecil adalah bahwa, pada kondisi operasi tertentu untuk setiap bus dalam sistem, besarnya tegangan bus meningkat seiring dengan peningkatan injeksi daya reaktif pada bus yang sama. Sistem dianggap tidak stabil jika, untuk setidaknya satu bus dalam sistem, besarnya tegangan bus (V) menurun seiring dengan peningkatan injeksi daya reaktif (Q) pada bus yang sama. Dengan kata lain, sistem dianggap stabil jika sensitivitas V-Q positif untuk setiap bus dan tidak stabil jika sensitivitas V-Q negatif untuk setidaknya satu bus.

2.2.3 Kriteria Desain dan Pengoperasian untuk Stabilitas

Untuk memastikan pelayanan listrik yang andal, sistem ketenagalistrikan harus tetap utuh dan mampu menahan berbagai gangguan. Oleh karena itu, sistem perlu dirancang dan dioperasikan sedemikian rupa sehingga kebanyakan gangguan yang tidak terduga dapat ditangani tanpa menyebabkan kehilangan beban (kecuali pada peralatan/komponen yang langsung terdampak), sehingga mencegah kerusakan yang meluas dan tak terkendali. Kriteria desain dan operasional berperan krusial dalam mencegah gangguan sistem besar setelah terjadi keadaan gangguan yang parah. Kriteria ini memastikan bahwa, dalam menghadapi berbagai kemungkinan yang sering terjadi, sistem akan beralih dari kondisi normal ke kondisi waspada, bukan ke kondisi yang lebih parah seperti darurat atau ekstrim. Ketika sistem memasuki kondisi waspada setelah keadaan darurat, operator dapat mengambil langkah-langkah untuk mengembalikan sistem ke kondisi normal [10].

Contoh kriteria desain dan operasional yang berkaitan dengan stabilitas sistem, serta jenis kontingensi yang dipertimbangkan dalam penilaian stabilitas, diantaranya sebagai berikut [10]:

1. Kontingensi Desain Normal

Kriteria ini mensyaratkan bahwa stabilitas sistem tenaga listrik yang besar harus tetap terjaga selama dan setelah gangguan yang parah, seperti yang dijelaskan di bawah ini, dengan mempertimbangkan isolasi atau pemutusan bagian yang terkena dampak. Kontingensi ini dipilih berdasarkan kemungkinan terjadinya yang signifikan, mengingat banyaknya elemen yang membentuk sistem tenaga listrik. Kontingensi desain normal dapat mencakup hal-hal berikut:

- a. Gangguan tiga fasa permanen pada generator, transmisi, trafo atau bagian bus, dengan memperhatikan pemutusan gangguan normal dan peralatan *reclosing*.
- b. Gangguan fasa ke tanah permanen pada fasa berbeda dari masing-masing dua sirkuit transmisi yang berdekatan pada tower sirkuit ganda, diatasi dalam waktu normal.
- c. Gangguan fase ke tanah permanen pada sirkuit transmisi, trafo, atau bagian bus manapun yang menyebabkan tertundanya pemutusan karena tidak berfungsinya circuit breaker, relai, atau saluran sinyal.
- d. Hilangnya atau lepasnya peralatan apapun tanpa ada gangguan.
- e. Gangguan permanen fase ke tanah pada circuit breaker, teratasi dalam waktu normal.
- f. Hilangnya kedua kutub fasilitas bipolar DC secara bersamaan dan permanen.

Dalam menghadapi situasi-situasi yang disebutkan di atas, penting bahwa stabilitas sistem tetap terjaga, dan tegangan serta beban pada saluran dan peralatan berada dalam standar yang ditetapkan.

2. Penilaian Kontingensi Ekstrim

Penilaian kontingensi ekstrim mengakui bahwa sistem tenaga listrik yang saling terhubung dapat mengalami kejadian yang tingkat keparahannya melebihi kontingensi rancangan normal. Tujuannya adalah untuk menilai dampak kontingensi ekstrim terhadap kinerja sistem guna mendapatkan indikasi kekuatan sistem dan menentukan sejauh mana gangguan sistem yang dapat meluas meskipun probabilitas terjadinya kontingensi ekstrim sangat rendah. Setelah analisis dan penilaian terhadap kontingensi ekstrim, perlu tindakan-tindakan yang harus diambil dan jika perlu mengurangi frekuensi terjadinya kontingensi tersebut atau untuk mengurangi konsekuensi yang diindikasikan sebagai hasil simulasi kontingensi tersebut. Kontingensi ekstrim diantaranya sebagai berikut :

- a. Hilangnya semua kemampuan (output) sebuah pembangkitan
- b. Hilangnya semua jalur yang berasal dari pembangkit, stasiun switching, atau gardu induk.
- c. Hilangnya semua jalur transmisi pada jalur umum.
- d. Gangguan tiga fasa permanen pada generator, jalur transmisi, trafo, atau bagian bus manapun dengan pemutusan gangguan yang tertunda dan dengan memperhatikan peralatan reclosing.
- e. Lepasnya beban besar secara tiba-tiba.
- f. Pengaruh power swing yang timbul dari gangguan di luar sistem yang saling berhubungan.
- g. Kegagalan atau kesalahan pengoperasian sistem proteksi khusus, seperti penolakan pembangkitan, penolakan beban, atau skema cross-tripping transmisi.

2.2.4 Persamaan Ayunan

Dalam kondisi normal, posisi sumbu rotor dan medan magnet tetap. Sudut antara keduanya disebut sudut daya atau torsi. Jika ada gangguan, rotor akan melambat atau mempercepat relatif terhadap kecepatan medan magnet sinkron, menghasilkan gerakan relatif yang dapat dijelaskan dalam persamaan ayunan. Jika rotor kembali ke kecepatan sinkron setelah berosilasi, generator akan tetap stabil. Jika gangguan tidak mengakibatkan perubahan total daya output yang dihasilkan, rotor akan kembali ke posisi awal. Namun, jika gangguan disebabkan oleh perubahan pembangkit, beban, atau jaringan, rotor akan mencapai sudut daya operasi baru relatif terhadap medan magnet yang berputar secara sinkron [3].

Jika resistansi jangkar dan fluks bocor diabaikan, maka sudut antara E dan tegangan bus V yang disebut δ , dianggap sebagai sudut daya. Misalkan sebuah generator sinkron yang menghasilkan torsi elektromagnetik T_e dan berputar pada kecepatan sinkron ω_{sm} . Jika T_m adalah torsi mekanik, maka dalam kondisi operasi *steady state* dengan mengabaikan *losses*, maka persamaannya yaitu [3]:

$$T_m = T_e \quad 2.16$$

Akibat dari gangguan yang terjadi, maka torsi akan mengalami percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) pada rotor. Sehingga menghasilkan selisih antara kedua torsi tersebut T_a , dengan persamaan :

$$T_a = T_m - T_e \quad 2.17$$

Dalam sebuah generator sinkron, pergerakan rotor dinyatakan berdasarkan hukum kedua Newton tentang gerak rotasi. Dengan mengabaikan torsi gesekan dan redaman, persamaan percepatan pada torsi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad 2.18$$

Nilai θ_m merupakan perpindahan sudut rotor relatif terhadap sumbu yang diam. Untuk menentukan posisi rotor terhadap sumbu yang bergerak dengan kecepatan sinkron, maka

referensi sudut diambil relatif terhadap acuan yang berputar sinkron dengan kecepatan sudut konstan ω_{sm} , yaitu:

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad 2.19$$

Nilai δ_m merupakan posisi sudut rotor sebelum terjadi gangguan ($t=0$) yang diukur relatif terhadap sumbu yang berputar secara sinkron. Untuk mengetahui kecepatan sudut rotor, dapat dilakukan dengan melakukan turunan pertama dari persamaan 2.19, yaitu:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad 2.20$$

Dengan persamaan percepatan rotornya yaitu:

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad 2.21$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.21 ke persamaan 2.18, maka akan diperoleh:

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad 2.22$$

Untuk memudahkan analisis, maka persamaan 2.22 diubah dalam bentuk daya. Persamaan 2.20 dikalikan dengan ω_m , maka diperoleh persamaan:

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad 2.23$$

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad 2.24$$

Perkalian $J\omega_m$ merupakan konstanta inersia dan dilambangkan dengan M . Ini berkaitan dengan energi kinetik dengan massa yang berputar (W_k), yaitu:

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad 2.25$$

Atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad 2.26$$

Meskipun M disebut sebagai konstanta inersia, sebenarnya tidak benar-benar konstan ketika kecepatan rotor berbeda dari kecepatan sinkron. Namun, karena ω_m tidak berubah secara signifikan sebelum stabilitas hilang, M dievaluasi pada kecepatan sinkron dan dianggap tetap konstan, yaitu,

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad 2.27$$

Maka, persamaan ayunan dengan konstanta inersia (M) akan menjadi:

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad 2.28$$

Untuk sebuah generator sinkron dengan p kutub, hubungan sudut daya listrik δ dengan sudut daya mekanik δ_m adalah:

$$\delta = \frac{P}{2} \delta_m \quad 2.29$$

Dan juga,

$$\omega = \frac{P}{2} \omega_m \quad 2.30$$

Maka, persamaan ayunan dengan menggunakan sudut daya listrik adalah:

$$\frac{2}{P} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad 2.31$$

Karena analisis sistem tenaga dilakukan dalam sistem per unit, persamaan ayunan biasanya dinyatakan juga dalam per unit. Dengan membagi persamaan 2.31 dengan daya dasar S_B , dan mensubstitusikan nilai M dari persamaan 2.27 menghasilkan:

$$\frac{2}{P} \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad 2.32$$

Konstanta H adalah hasil bagi antara energi kinetik pada kecepatan rating dengan rating mesin, dan dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$H = \frac{\text{Energi kinetik (MJ) pada kecepatan rating}}{\text{Rating mesin (MVA)}} = \frac{W_k}{S_B} \quad 2.33$$

Konstanta H memiliki kelebihan karena nilainya cenderung berada dalam kisaran yang terbatas, biasanya antara 1 sampai 10 satuan per unit-sekon. Dengan mensubstitusikan persamaan 2.33 ke persamaan 2.32, maka :

$$\frac{2}{P} \frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m (pu)} - P_{e (pu)} \quad 2.34$$

Nilai $P_{m (pu)}$ dan $P_{e (pu)}$ adalah daya mekanis dan daya listrik per unit. Hubungan kecepatan sudut listrik dengan kecepatan sudut mekanik yaitu $\omega_{sm} = \frac{2}{P} \omega_s$. Maka, dengan mensubstitusikan persamaan tersebut ke persamaan 2.34 akan diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m (pu)} - P_{e (pu)} \quad 2.35$$

Persamaan di atas sering kali dinyatakan dalam frekuensi f_0 . Hal tersebut merupakan penjabaran dari kecepatan sudut $\omega_s = 2\pi f_0$. Sehingga persamaannya menjadi:

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m (pu)} - P_{e (pu)} \quad 2.36$$

Jika δ dinyatakan dalam radian, maka persamaan ayunan akan menjadi:

$$\frac{H}{180f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m (pu)} - P_{e (pu)} \quad 2.37$$

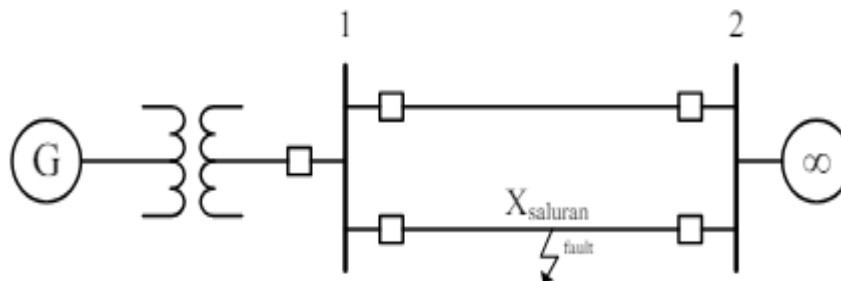
2.2.5 Stabilitas Transien

Studi stabilitas transien merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertanahkan sinkronisasi setelah sistem mengalami gangguan besar. Gangguan ini bisa berupa penambahan beban secara mendadak, lepasnya pembangkit, lepasnya beban besar, atau gangguan lain pada sistem. Sering sekali gangguan yang terjadi mengakibatkan osilasi yang memiliki magnitudo yang besar sehingga linearisasi tidak bisa diterapkan sehingga persamaan ayunan nonlinier harus diselesaikan [3]. Pada kondisi ayunan pertama dari stabilitas transien, diasumsikan bahwa Automatic Voltage Regulator (AVR) dan governor belum beroperasi. Jika beban yang dipikul lebih besar daripada daya yang dibangkitkan, maka putaran rotor mesin akan melambat dalam waktu singkat. Sebaliknya, jika daya yang dibangkitkan oleh generator lebih besar daripada beban yang dipikul, maka putaran rotor akan meningkat.

Salah satu metode untuk mengetahui stabilitas sistem adalah *Equal Area Criterion (EAC)*. Metode ini hanya berlaku untuk sistem satu mesin yang terhubung ke bus tak terbatas (SMIB) atau sistem dua mesin. Karena metode ini memberikan pemahaman tentang perilaku dinamis mesin, penerapannya pada analisis mesin tunggal yang terhubung ke sistem besar sangat berguna [3].

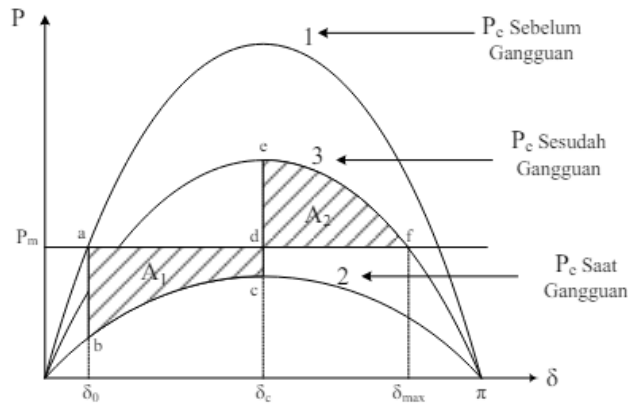
Equal Area Criterion (EAC) merupakan metode yang berdasarkan pada persamaan ayunan dan kurva daya terhadap sudut rotor dengan sistem SMIB. Konsep ini dapat diterapkan ketika luas area percepatan dan perlambatan pada sudut rotor seimbang pada sudut kritis, seperti yang ditunjukkan dalam persamaan berikut [12]:

$$|\text{Area A1}| = |\text{Area A2}| \quad 2.38$$



Gambar 2.7 SMIB dengan Gangguan Terjadi di Saluran

Pada gambar 2.7, kondisi digambarkan ketika gangguan terjadi di antara bus atau mungkin di tengah saluran. Diasumsikan bahwa nilai daya input P_m tetap konstan dan generator beroperasi dalam kondisi stabil sebelum gangguan, dengan sudut daya δ_0 .

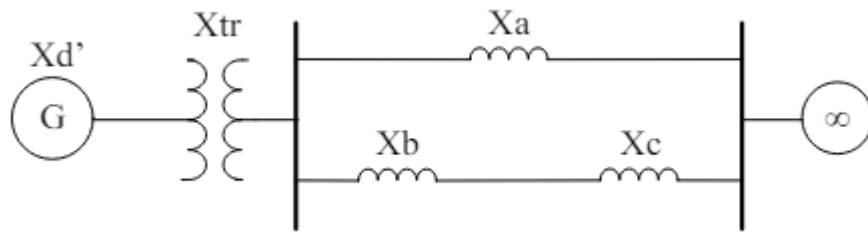


Gambar 2.8 Kurva *Equal Area Criterion*

Pada gambar 2.8, terdapat tiga bentuk kurva yang masing-masing terdiri dari:

1. Kondisi Sebelum Gangguan

Saat kondisi sebelum gangguan, sistem masih berjalan normal. Rangkaian ekuivalen dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.9 Rangkaian Ekuivalen SMIB Sebelum Gangguan

Berdasarkan gambar 2.9, nilai reaktansi sebelum gangguan (X_1) yaitu :

$$X_1 = X_d' + X_{tr} + \frac{(X_b + X_c) \times X_a}{X_a + X_b + X_c} \quad 2.39$$

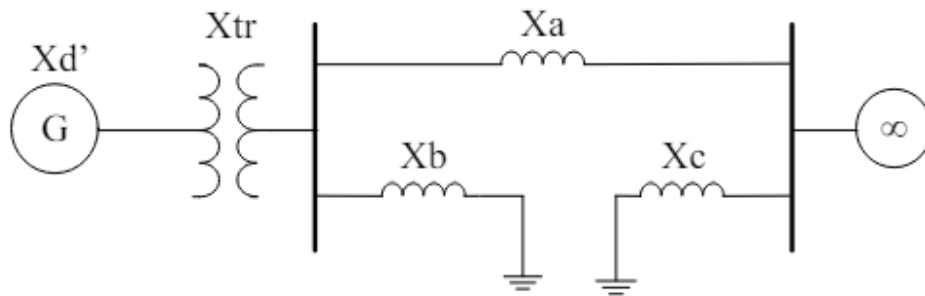
Maka, nilai $P_{e1 \max}$ dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{e1 \max} = \frac{|E||V|}{X_1} \quad 2.40$$

$$P_{e1} = P_{e1 \max} \times \sin \delta \quad 2.41$$

2. Kondisi Saat Gangguan

Saat kondisi saat gangguan. Rangkaian ekuivalen dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.10 Rangkaian Ekuivalen SMIB Saat Gangguan

Dari gambar 2.10, saat terjadi hubung singkat, reaktansi X_b terhubung langsung ke tanah, sehingga nilai X_c tidak diperhitungkan. Maka, nilai reaktansi saat gangguan (X_2) yaitu :

$$X_2 = \frac{((X_{d'} + X_{tr}) \times X_b) + (X_a \times X_b) + ((X_{d'} + X_{tr}) \times X_a)}{X_b} \quad 2.42$$

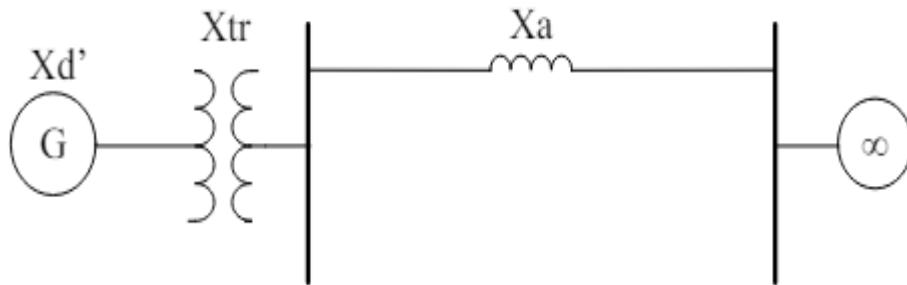
Maka, nilai $P_{e1 \max}$ dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_{e2 \max} = \frac{|E||V\sim|}{X_2} \quad 2.43$$

$$P_{e2} = P_{e2 \max} \times \sin \delta \quad 2.44$$

3. Kondisi Sesudah Gangguan

Saat kondisi sesudah gangguan. Rangkaian ekuivalen dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.11 Rangkaian Ekuivalen SMIB Sesudah Gangguan

Pada gambar 2.11, setelah terjadinya hubung singkat, Circuit Breaker terbuka. Akibatnya, nilai reaktansi total pada kondisi ini dihitung secara seri. Maka, nilai reaktansi sesudah gangguan (X_3) yaitu:

$$X_3 = X_{d'} + X_{tr} + X_a \quad (\text{persamaan 8}) \quad 2.45$$

Maka, nilai $P_{e1 \max}$ dapat dinyatakan sebagai berikut:

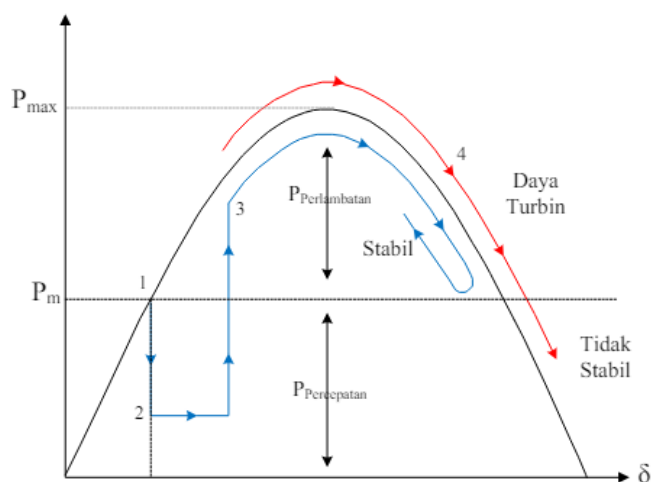
$$P_{e3 \max} = \frac{|E||V\sim|}{X_3} \quad (\text{Persamaan 9}) \quad 2.46$$

$$P_{e3} = P_{e3 \max} \times \sin \delta \quad (\text{Persamaan 10}) \quad 2.47$$

Berdasarkan grafik dari EAC sebagaimana terlihat pada Gambar (Gambar Kurva *Equal Area Criterion*), untuk menentukan sudut kritis, dapat dilakukan dengan persamaan berikut ini:

$$\cos \delta_c = \frac{P_m(\delta_{\max} - \delta_0) + P_3 \cos(\delta_{\max}) - P_2 \cos(\delta_0)}{P_3 \max - P_2 \max} \quad 2.48$$

$$\delta_c = \cos^{-1} \frac{P_m(\delta_{\max} - \delta_0) + P_3 \cos(\delta_{\max}) - P_2 \cos(\delta_0)}{P_3 \max - P_2 \max} \quad 2.49$$



Gambar 2.12 Kurva Hubungan P dan δ

Analisa stabilitas transien pada gambar 2.12 memberikan ilustrasi mengenai respon generator pada keadaan gangguan. Titik nomor 1 (titik awal) merupakan kondisi normal generator sebelum terjadi gangguan. Titik nomor 2 merupakan kondisi saat terjadi gangguan yang menyebabkan daya output (P_e) generator turun secara drastis. Titik nomor 3 merupakan kondisi saat gangguan telah hilang dan daya output generator dapat pulih kembali sesuai dengan nilai pada kurva P- δ . Titik nomor 4 merupakan kondisi setelah gangguan telah dihilangkan, daya output dari generator menjadi lebih besar dari daya mekanik (P_m). Hal ini mengakibatkan perlambatan pada rotor generator.

Jika terdapat torsi lawan yang cukup setelah hilangnya gangguan untuk menyeimbangkan percepatan selama gangguan, generator bisa menjaga stabilitasnya dan kembali ke titik operasi normalnya dalam waktu sekitar setengah detik. Namun, jika torsi lawan tidak mencukupi untuk menyeimbangkan percepatan, sudut rotor atau daya dapat terus meningkat, menyebabkan generator kehilangan sinkronisasi dengan sistem atau bahkan keluar dari sinkronisasi.

2.2.6 Konsep Dasar Hubung Singkat

Hubung singkat adalah salah satu masalah yang terjadi dalam sistem tenaga listrik. Menurut standar IEC 60909, hubung singkat terjadi ketika terdapat hubungan konduktif, baik disengaja maupun tidak antara dua atau lebih titik yang memiliki perbedaan potensial, dengan hambatan atau impedansi yang sangat rendah. Hubung singkat bisa disebabkan oleh berbagai faktor seperti kegagalan isolasi, petir, operasi switching, angin, terkena pohon atau benda-benda lain yang jatuh, dan lain sebagainya [12].

Pada umumnya, kesalahan seperti itu menghasilkan arus hubung singkat maksimum yang menjadi dasar perhitungan sistem proteksi. Jika arus gangguan terus berlangsung, dapat menyebabkan kerusakan termal pada peralatan. Beberapa prinsip yang digunakan dalam analisis hubung singkat ialah

1. Beban diasumsikan normal dan satuan nilai dikonversikan ke dalam satuan p.u.
2. Kapasitansi line charging, hubung shunt ke tanah diabaikan.
3. Semua tegangan internal sistem mempunyai magnitude dan phase sama (diasumsikan $V = 1$ pu.).
4. Biasanya tahanan seri dari saluran transmisi dan trafo diabaikan.

5. Semua trafo dianggap pada posisi tap nominal.
6. Generator, motor, trafo, dan saluran transmisi direpresentasikan dengan sumber tegangan tetap yang dihubungkan seri dengan nilai reaktansi:

- a. Reaktansi subtransien (X_d'')

Reaktansi subtransien digunakan untuk menghitung arus hubung singkat selama siklus pertama setelah terjadinya hubung singkat, yang terjadi dalam rentang waktu 0.05 - 0.1 detik.

- b. Reaktansi transien (X_d')

Reaktansi transien digunakan untuk menghitung arus hubung singkat setelah beberapa siklus berlalu setelah terjadinya hubung singkat, yang biasanya terjadi dalam rentang waktu 0.2 - 2 detik.

- c. Reaktansi sinkron (X_d)

Reaktansi sinkron digunakan untuk menentukan arus hubung singkat setelah sistem mencapai kondisi keseimbangan steady-state.

2.2.6.1 Hubung Singkat Simetris

Gangguan hubung singkat simetris adalah jenis gangguan di mana besar arus gangguan sama pada setiap fasa. Gangguan ini umumnya terjadi saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. Jenis hubung singkat ini khusus untuk situasi dimana terjadi hubung singkat antara tiga fasa, baik dengan atau tanpa koneksi ke tanah (gangguan hubung singkat tiga fasa dan gangguan hubung singkat tiga fasa ketanah). Gangguan simetris mengakibatkan semua fasa terganggu dengan cara yang sama, sehingga arus dan tegangan pada setiap fasa tetap seimbang setelah gangguan terjadi.

Dalam perhitungan gangguan simetris, tidak terjadi busur api ketika gangguan terjadi karena konduktor tidak bersentuhan dengan tanah. Persamaan arus hubung singkat 3 fasa yaitu:

$$I_{\text{fault}} = \frac{V_{\text{source}}}{Z_L + Z_S} \quad 2.50$$

Keterangan:

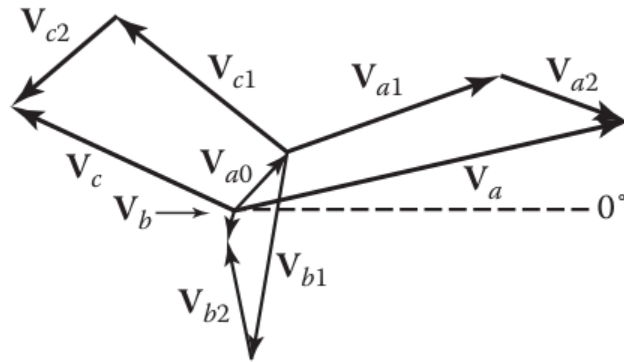
I_{fault} = arus gangguan

V_{source} = tegangan sistem

Z_S = impedansi peralatan sistem

Z_L = impedansi saluran sistem

Metode komponen simetris mengasumsikan bahwa sistem tenaga listrik yang awalnya tidak seimbang dalam tiga fasa dapat diuraikan menjadi tiga komponen simetris yang independen satu sama lain, yaitu komponen positif, negatif, dan nol. Meskipun sistem awalnya mungkin tidak seimbang, namun dengan menggunakan metode ini, analisis dapat dilakukan seolah-olah sistem tersebut dalam keadaan seimbang. Dengan cara ini, perhitungan dan pemecahan masalah pada sistem yang tidak seimbang dapat dilakukan dengan lebih mudah dan efisien, karena menerapkan prinsip-prinsip yang diterapkan pada sistem seimbang.



Gambar 2.13 Fasor Tidak Seimbang (Asimetri)

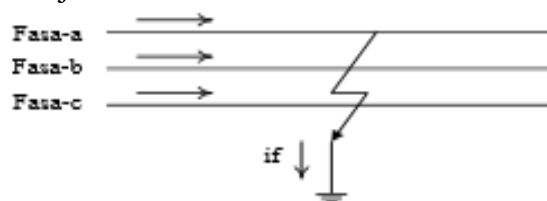
Pada hubung singkat tiga fasa, urutan positif (*positive sequence*), urutan negatif (*negative sequence*), dan urutan nol (*zero sequence*) disimbolkan dengan angka 1, 2, dan 0 secara berturut-turut.

2.2.6.2 Hubung Singkat Tidak Simetris (Asimetris)

Hubung singkat asimetris terjadi pada sistem yang terdiri dari satu atau tiga fasa. Hubung singkat yang tidak simetris ini dikelompokkan menjadi:

1. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (L-G)

Gangguan yang umum terjadi dalam sistem tenaga listrik adalah gangguan asimetris, yang memerlukan penerapan metode komponen simetris untuk menganalisis tegangan dan arus saat gangguan terjadi.



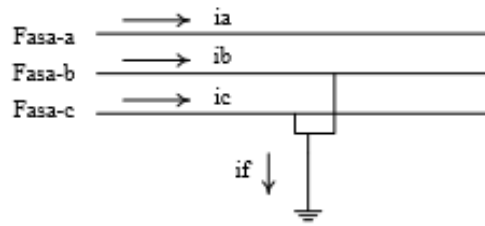
Gambar 2.14 Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Gangguan ini dapat dianalisis dengan menghubungkan semua sumber tegangan dalam sistem dan mengganti titik gangguan dengan sumber tegangan yang memiliki besaran yang sama dengan tegangan pada saat sebelum gangguan terjadi. Dengan menggunakan pendekatan ini, sistem tiga fasa yang tidak seimbang dapat dimodelkan melalui teori komponen simetris, yang terdiri dari komponen urutan positif, negatif, dan nol. Persamaan untuk gangguan satu fasa ke tanah adalah sebagai berikut:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \quad 2.51$$

2. Gangguan dua fasa ke tanah (L-L-G)

Gangguan dua fasa ke tanah terjadi ketika dua fasa dari sistem tenaga listrik terhubung singkat dengan tanah.



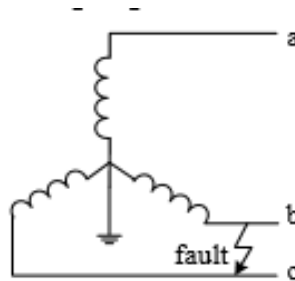
Gambar 2.15 Gangguan Dua Fasa ke Tanah

Persamaan untuk gangguan dua fasa ke tanah adalah sebagai berikut :

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad 2.52$$

3. Gangguan fasa ke fasa (L-L)

Gangguan hubung singkat dua fasa terjadi ketika dua fasa dari sistem tenaga listrik mengalami hubung singkat.



Gambar 2.16 Gangguan Antar Fasa (L-L)

Persamaan untuk gangguan dua fasa adalah sebagai berikut:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2} \quad 2.53$$

2.2.7 Critical Clearing Time

Penentuan waktu *Critical Clearing Time* (CCT) sangat penting untuk mempertahankan kestabilan sistem tenaga listrik. Sudut rotor setiap generator berubah seiring waktu dan mempengaruhi sudut rotor relative antara masing – mmasing generator. Dalam metode *time domain simulation*, perubahan sudut rotor relatif mempengaruhi atau menentukan stabilitas transien sistem [13]. CCT diperlukan untuk mengatasi gangguan pada sistem tenaga listrik agar generator tidak mengalami lepas sinkron. Dalam konteks kestabilan transien, CCT mengacu pada durasi maksimum setelah dimulainya gangguan hingga keadaan operasi normal dapat dipulihkan tanpa menyebabkan kegagalan sinkronisasi generator. Jika gangguan berhasil diatasi dalam waktu kurang dari CCT yang telah ditentukan, generator memiliki kemungkinan untuk pulih dan kembali menjadi stabil. Namun, jika penanganan gangguan memakan waktu lebih dari CCT yang ditentukan, generator berisiko mengalami kegagalan kestabilan transien dan dapat mengalami lepas sinkron.

Menurut Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 20 Tahun 2020, ketika terjadi gangguan diharapkan waktu pemutusan gangguan dapat dilakukan dengan secepat mungkin. Waktu pemutusan gangguan mulai dari saat terjadinya gangguan sampai

dengan padamnya busur listrik oleh terbukanya *Circuit Breaker* (CB), harus kurang dari atau sama dengan:

1. 90 mili detik untuk 500 kV
2. 100 mili detik untuk 275 kV
3. 120 mili detik untuk 150 kV
4. 150 mili detik untuk 66 kV

2.2.8 Standar yang Digunakan Untuk Studi Analisis Kestabilan Transien

2.2.8.1 Standar Sudut Rotor

Pada generator, jika torsi input meningkat hingga sudut rotor melebihi 90° , akan menyebabkan *slip pole* dan kehilangan sinkronisasi dengan asumsi jika beban tetap konstan. Kopling antara medan stator dan rotor dalam mesin sinkron cukup elastis. Jika terjadi perubahan mendadak pada parameter yang mempengaruhi torsi, sudut rotor bisa melampaui nilai yang ditentukan, bahkan melewati 90° dalam kondisi normal atau 180° dalam ayunan transien, menyebabkan mesin kehilangan sinkronisasi. Jika gangguan ini tidak diperbaiki, mesin akan terus kehilangan sinkronisasi dengan sistem.

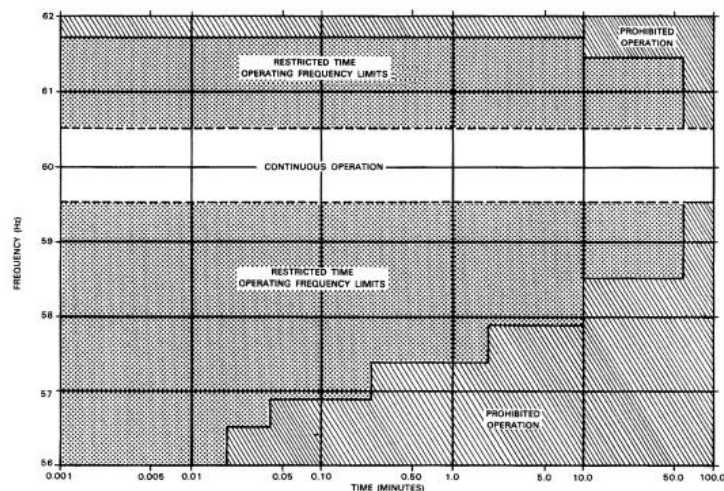
Jika lonjakan (*Overshoot*) transien tidak melebihi 180° atau jika gangguan cepat dihilangkan, generator akan tetap sinkron. Sudut rotor kemudian akan berosilasi dan berayun semakin kecil hingga stabil pada nilai kurang dari 90° [14].

Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 20 Tahun 2020, lamanya waktu pemutusan gangguan dari saat terjadinya gangguan hingga padamnya busur api bergantung pada level tegangan sistem. Batas waktu pemutusan gangguan sampai dengan terbukanya *circuit breaker*, yaitu:

1. ≤ 90 mili detik untuk 500 kV
2. ≤ 100 mili detik untuk 275 kV
3. ≤ 120 mili detik untuk 150 kV
4. ≤ 150 mili detik untuk 66 kV

2.2.8.2 Standar Frekuensi

Standar frekuensi pada tugas akhir ini menggunakan standar *steam turbine* (IEEE Std C37.106-2003) [15].



Gambar 2.17 Batas Operasi Frekuensi Abnormal untuk *Steam Turbine*

Pada gambar 2.17, terdapat 3 daerah operasi *steam turbine* yaitu :

1. *Prohibited operation*, merupakan daerah frekuensi yang dilarang beroperasi pada area tersebut.
2. *Restricted time operating frequency limits*, merupakan daerah dengan batas frekuensi pengoperasian waktu terbatas (bersifat sementara).
3. *Continuous operation*, merupakan daerah dengan batas frekuensi pengoperasian waktu tidak terbatas (normal).

IEEE Std C37.106-2003 merupakan standar yang digunakan untuk frekuensi abnormal yang digunakan di sistem dengan frekuensi 60 Hz. Pada tugas akhir ini akan digunakan sebagai standar frekuensi sistem 50 Hz sehingga diperlukan konversi dari frekuensi 60 Hz.

Tabel 2.1 Konversi Standar Frekuensi 60 Hz ke 50 Hz untuk *Underfrequency Limit*

<i>Underfrequency Limit</i>		<i>Minimum Time</i>
<i>60 Hz system</i>	<i>50 Hz system</i>	
60,0 – 59,5 Hz	50,0 Hz – 49,583 Hz	N/A (<i>continuous operating range</i>)
59,4 – 58,5 Hz	49,5 – 48,75 Hz	3 <i>minutes</i>
58,4 – 57,9 Hz	48,667 – 48,25 Hz	30 <i>seconds</i>
57,8 – 57,4 Hz	48,167 – 47,833 Hz	7,5 <i>seconds</i>
57,3 – 56,9 Hz	47,75 – 47,417 Hz	45 <i>cycles</i>
56,8 – 56,5 Hz	47,333 – 47,083 Hz	7,2 <i>cycles</i>
Less than 56,4 Hz	Less than 47 Hz	<i>Instantaneous Trip</i>

Tabel 2.2 Konversi Standar Frekuensi 60 Hz ke 50 Hz untuk *Overfrequency Limit*

<i>Overfrequency Limit</i>		<i>Minimum Time</i>
<i>60 Hz system</i>	<i>50 Hz system</i>	
60,0 – 60,5 Hz	50,0 – 50,417 Hz	N/A (<i>continuous operating range</i>)
60,6 – 61,5 Hz	50,5 – 51,25 Hz	3 <i>minutes</i>
61,6 – 61,7 Hz	51,333 – 51,417 Hz	30 <i>seconds</i>
Greater than 61,7 Hz	Greater than 51,417 Hz	<i>Instantaneous Trip</i>

Menurut aturan jaringan sistem tenaga listrik (*grid code*) yang tercantum pada Peraturan Menteri ESDM No.20 Tahun 2020, Frekuensi nominal di jaringan listrik sebesar 50 Hz. Frekuensi dalam operasi normal berada pada kisaran 50 Hz \pm 0,20 Hz. Pengelola operasi sistem PT PLN (Persero) harus mengupayakan frekuensi dalam keadaan normal. Frekuensi sistem dapat naik atau turun dari frekuensi nominalnya. Frekuensi sistem dapat naik hingga 52 Hz dan turun hingga 47 Hz pada keadaan gangguan besar. Berikut batas rentang frekuensi operasi dari jaringan listrik di Indonesia sebagai berikut:

Tabel 2.3 Batas rentang Frekuensi Operasi

Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi
51,50 Hz < f \leq 52,00 Hz	Beroperasi selama paling singkat 15 menit
51,00 Hz < f \leq 51,50 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit

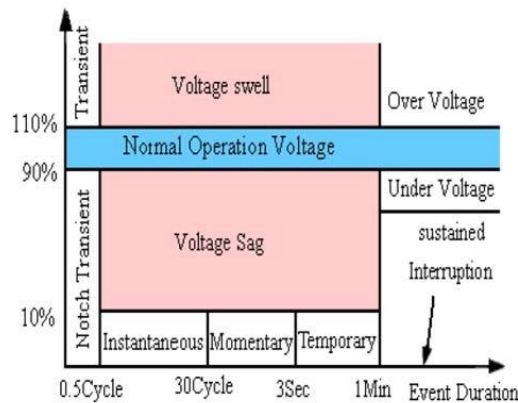
Tabel 2.3 Batas rentang Frekuensi Operasi (Lanjutan)

Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi
$49,00 \text{ Hz} \leq f \leq 51,00 \text{ Hz}$	Beroperasi secara terus-menerus
$47,50 \text{ Hz} < f < 49,00 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
$47,00 \text{ Hz} < f \leq 47,50 \text{ Hz}$	Beroperasi selama paling singkat 6 detik

*f: frekuensi pada jaringan

2.2.8.3 Standar Tegangan

Standar tegangan pada pengerjaan tugas akhir ini menggunakan standar *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* (IEEE Std 1159-1995) [16].



Gambar 2.18 Standar Tegangan IEEE Std 1159-1995, Karakteristik *Voltage Sag*

Berikut penjelasan terkait gambar 2.18 mengenai standar IEEE 1159-1995 yang terlihat pada tabel 2.4.

Tabel 2.4 Standar Tegangan IEEE Std 1159-1995

Categories		Typical Duration	Typical Voltage Magnitude
Short Duration Variations	Instantaneous		
	1. Sag	0,5 – 30 cycles	0,1 – 0,9 pu
	2. Swell	0,5 – 30 cycles	1,1 – 1,8 pu
	Memontary		
	1. Interruption	0,5 cycles – 3 s	< 0,1 pu
	2. Sag	30 cycles – 3 s	0,1 – 0,9 pu
	3. Swell	30 cycles – 3 s	1,1 – 1,4 pu
	Temporary		
	1. Interruption	3 s – 1 min	< 0,1 pu
	2. Sag	3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
3. Swell	3 s – 1 min	1,1 – 1,2 pu	
Long Duration Variations	Interruption, Sustained	>1 min	0,0 pu
	Undervoltages	>1 min	0,8 – 0,9 pu
	Overvoltages	>1 min	1,1 – 1,2 pu

Untuk menganalisa tegangan nominal yang diperbolehkan di sistem kelistrikan Indonesia, maka digunakan standar tegangan yang ada di Indonesia. Menurut Peraturan Menteri ESDM No.20 Tahun 2020, perubahan tegangan pada jaringan harus dipertahankan dalam batas rentang variasi tegangan sebagai berikut:

Tabel 2.5 Batas Rentang Variasi Tegangan

Tegangan Nominal	Kondisi Normal
500 kV	+5%, -5%
275 kV	+5%, -5%
150 kV	+5%, -10%
66 kV*	+5%, -10%

Untuk tegangan maksimum pada kondisi tidak normal dibatasi nilai tegangannya sebagai berikut :

Tabel 2.6 Batas Tegangan Maksimum

Tegangan Nominal	Kondisi Normal
500 kV	550 kV
275 kV	300 kV
150 kV	170 kV
66 kV*	72,5 kV

*) Ketentuan tegangan 66 (enam puluh enam) kV untuk sistem distribusi diatur dalam Aturan Distribusi.

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Metode yang Digunakan

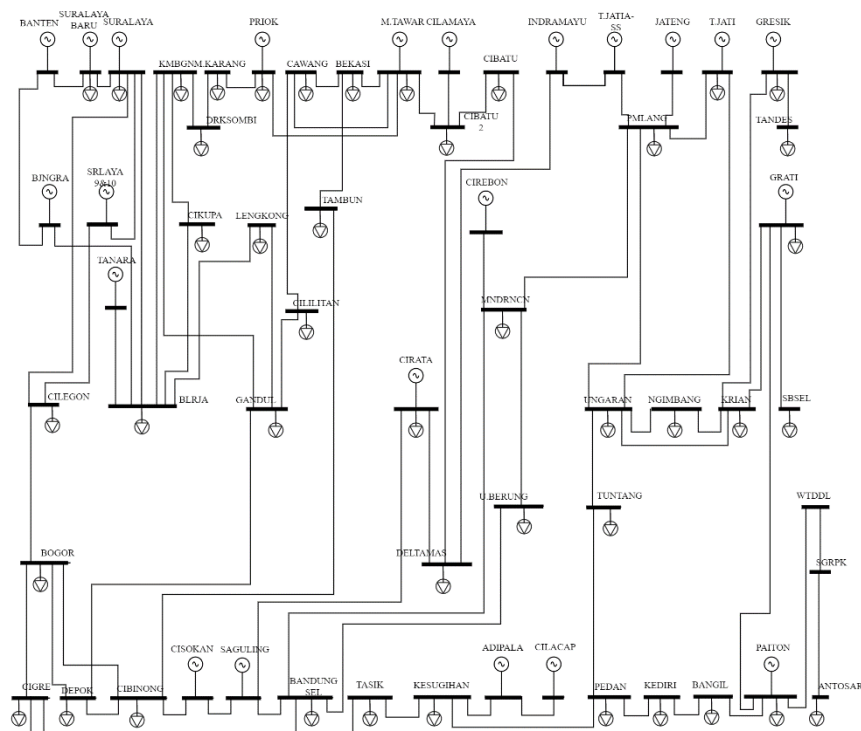
Metode yang digunakan untuk melihat stabilitas transien pada tugas akhir ini yaitu menggunakan metode *time domain simulation* (domain waktu) dengan bantuan *software* ETAP. Metode simulasi domain waktu adalah teknik yang digunakan untuk menganalisis dinamika sistem tenaga listrik dalam domain waktu, membantu memahami respon sistem terhadap berbagai gangguan seperti hubung singkat, lepas generator, lepas saluran, dan kehilangan beban. Dalam tugas akhir ini, digunakan *software* ETAP (*Electrical Transient Analyzer Program*) untuk memodelkan dan mensimulasikan respon sudut rotor generator, frekuensi, dan tegangan. Langkah-langkah yang dilakukan meliputi pemodelan sistem, penginputan data, pelaksanaan simulasi, dan analisis hasil. Setelah data sistem dimasukkan dan kondisi operasi awal diketahui (*loadflow*), studi kasus gangguan didefinisikan dan simulasi dijalankan untuk periode waktu tertentu. Hasil simulasi menunjukkan bagaimana sudut rotor generator, frekuensi, dan tegangan bereaksi terhadap gangguan.

3.2 Bahan dan Peralatan yang Digunakan

Bahan dan peralatan yang dibutuhkan dalam penyelesaian tugas akhir ini antara lain sebagai berikut:

3.2.1 Sistem Kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV

Dalam melakukan analisis stabilitas transien, dibutuhkan diagram satu garis (*single line diagram*) dari sistem kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV. Data yang digunakan pada tugas akhir ini yaitu data kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV tahun 2026. Berikut diagram satu garis dari sistem kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV.



Gambar 3.1 Single Line Diagram (SLD) Sistem Jawa Madura Bali 500 kV

3.2.2 Data Saluran Transmisi Jawa Madura Bali 500 kV

Dalam melakukan simulasi, dibutuhkan data saluran transmisi antar bus yang terdiri atas resistansi, reaktansi, *line charging*, dan panjang saluran. Pada tabel 3.1 menunjukkan data saluran transmisi Jawa Madura Bali 500 kV.

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi Jawa Madura Bali 500 kV

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	½ B (pu)
Banten	Bojonegara	7.162E-05	5.830E-04	1.368E-01
Banten	Suralaya Baru	5.373E-06	4.374E-05	1.026E-02
Suralaya Baru	Suralaya.	5.055E-06	6.193E-05	1.495E-02
Suralaya.	Cilegon	6.441E-05	6.230E-04	1.480E-01
Suralaya.	Balaraja	3.872E-04	3.151E-03	7.393E-01
Kembangan	Gandul	1.556E-04	1.505E-03	3.574E-01
Kembangan	Duri Kosambi	1.213E-05	1.486E-04	3.588E-02
Kembangan	Balaraja	2.753E-04	3.664E-03	1.675E-01
M.Karang	Duri Kosambi	6.066E-05	7.431E-04	1.794E-01
M.Karang	Priok	4.044E-05	4.954E-04	1.196E-01
Priok	M.Tawar	6.066E-05	7.431E-04	1.794E-01
Cawang	Bekasi	2.089E-04	1.898E-03	8.421E-02
Cawang	M.Tawar	5.955E-04	5.410E-03	2.400E-01
Bekasi	M.Tawar	7.976E-05	6.492E-04	1.523E-01
Bekasi	Tambun	6.514E-05	5.302E-04	1.244E-01
M.Tawar	Cibatu 2	1.774E-04	1.716E-03	4.075E-01
Cilamaya	Cibatu 2	1.847E-04	2.263E-03	5.463E-01
Cibatu	Cibatu 2	2.581E-05	2.496E-04	5.928E-02
Tuntang	Pedan	2.890E-04	2.796E-03	6.639E-01
Ungaran	Tuntang	1.135E-04	1.098E-03	2.608E-01
Gresik	Tandes	5.419E-05	5.242E-04	1.245E-01
Grati	Sbsel	3.362E-04	2.737E-03	6.420E-01
Mandirancan	U.Berung	1.072E-03	9.741E-03	4.322E-01
Watudodol	Paiton	5.298E-04	6.490E-03	1.567E+00
Pedan	Kediri	1.055E-03	1.021E-02	2.425E+00
Ungaran	Ngimbang	2.485E-03	2.258E-02	1.002E+00
Gresik	Krian	1.474E-04	1.200E-03	2.815E-01
Ungaran	Krian	3.153E-03	2.865E-02	1.271E+00
Grati	Krian	4.098E-04	3.964E-03	9.415E-01
Gandul	Depok	3.654E-05	2.974E-04	6.977E-02
Depok	Cibinong	9.605E-05	7.818E-04	1.834E-01

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi Jawa Madura Bali 500 kV (Lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	½ B (pu)
Bangil	Paiton	4.821E-04	4.664E-03	1.108E+00
Pemalang	Mandirancan	6.754E-04	8.273E-03	1.998E+00
Watudodol	Segara Rupek	1.839E-05	2.056E-04	4.899E-02
Cirata	Saguling	1.552E-04	1.264E-03	2.965E-01
Saguling	Bandung Sel	2.013E-04	1.947E-03	4.624E-01
Mandirancan	Bandung Sel	4.825E-04	5.910E-03	1.427E+00
Tasik	Kesugihan	5.600E-04	5.417E-03	1.286E+00
Kesugihan	Adipala	5.593E-05	6.852E-04	1.654E-01
Adipala	Cilacap	1.937E-05	2.373E-04	5.729E-02
Kesugihan	Pedan	1.012E-03	9.785E-03	2.324E+00
Segara Rupek	Antosari	4.141E-04	5.073E-03	1.225E+00
Grati	Paiton	4.561E-04	4.411E-03	1.048E+00
Bojonegara	Balaraja	3.701E-04	3.013E-03	7.068E-01
Tanara	Balaraja	8.484E-05	1.039E-03	2.509E-01
Cikupa	Balaraja	3.741E-05	4.583E-04	1.106E-01
Balaraja	Lengkong	1.254E-04	1.536E-03	3.708E-01
Lengkong	Gandul	9.870E-05	8.034E-04	1.885E-01
Cilegon	Bogor	1.430E-03	1.299E-02	5.764E-01
Bogor	Depok	1.576E-04	1.282E-03	3.009E-01
Cigereleng	Tasik	4.387E-04	4.244E-03	1.008E+00
Bogor	Cigereleng	5.732E-04	4.665E-03	1.094E+00
Cirata	Deltamas	2.224E-04	2.152E-03	5.110E-01
T.Jatia-Ss	Pemalang	5.338E-04	6.539E-03	1.579E+00
Jateng	Pemalang	8.088E-05	9.908E-04	2.392E-01
Pemalang	Ungaran	3.671E-04	3.551E-03	8.433E-01
T.Jati	Pemalang	7.328E-04	8.977E-03	2.167E+00
Cirebon	Mandirancan	4.044E-05	4.954E-04	1.196E-01
Indramayu	T.Jatia-Ss	3.697E-04	4.529E-03	1.094E+00
Cigereleng	Bandung Sel	6.596E-05	6.380E-04	1.515E-01
Tambun	Cibinong	1.352E-04	1.100E-03	2.581E-01
Cibinong	Cisokan	3.541E-04	3.425E-03	8.134E-01
Cisokan	Saguling	1.007E-04	9.745E-04	2.314E-01
U.Berung	Bandung Sel	4.080E-04	3.707E-03	1.645E-01
Indramayu	Deltamas	3.646E-04	4.467E-03	1.079E+00
Cibatu	Deltamas	1.032E-05	9.985E-05	2.371E-02

Tabel 3.1 Data Saluran Transmisi Jawa Madura Bali 500 kV (Lanjutan)

Dari Bus	Ke Bus	R (pu)	X (pu)	½ B (pu)
T.Jati	Ungaran	6.957E-04	6.730E-03	1.598E+00
Bogor	Cibinong	2.787E-04	2.532E-03	1.124E-01
Kediri	Bangil	4.423E-04	4.278E-03	1.016E+00
Ngimbang	Krian	6.324E-04	5.746E-03	2.549E-01
Suralaya.	Suralaya 9&10	6.193E-06	5.991E-05	1.423E-02
Suralaya 9&10	Cilegon	3.613E-05	3.495E-04	8.299E-02
Cawang	Cililitan	3.085E-06	2.511E-05	5.890E-03
Cililitan	Gandul	1.234E-04	1.004E-03	2.356E-01
Kembangan	Cikupa	1.978E-04	2.632E-03	1.203E-01

3.2.3 Data Pembangkitan Jawa Madura Bali 500 kV

Data kapasitas pembangkit dan pembangkitan yang digunakan pada sistem Jawa Madura Bali 500 kV dapat dilihat pada tabel 3.2 yaitu sebagai berikut:

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Generator Jawa Madura Bali 500 kV

Nama Pembangkit	Kapasitas Pembangkit		Pembangkitan
	MVA	PF (%)	MW
PLTA Cirata 1	140	90	115
PLTA Cirata 2	140	90	115
PLTA Cirata 3	140	90	115
PLTA Cirata 4	140	90	115
PLTA Cirata 5	140	90	115
PLTA Cirata 6	140	90	115
PLTA Cirata 7	140	90	115
PLTA Cirata 8	140	90	115
PLTA Cisokan 1	306	85	240
PLTA Cisokan 2	306	85	240
PLTA Cisokan 3	306	85	240
PLTA Cisokan 4	306	85	240
PLTA Saguling 1	206,1	85	160
PLTA Saguling 2	206,1	85	160
PLTA Saguling 3	206,1	85	160
PLTA Saguling 4	206,1	85	160
PLTG M.Tawar 3.1	186	80	130
PLTG M.Tawar 3.2	186	80	130
PLTG M.Tawar 3.3	186	80	130

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Generator Jawa Madura Bali 500 kV (Lanjutan)

Nama Pembangkit	Kapasitas Pembangkit		Pembangkitan
	MVA	PF (%)	MW
PLTG M.Tawar 4.1	186	80	130
PLTG M.Tawar 4.2	186	80	130
PLTG M.Tawar 4.3	186	80	130
PLTGU Cilamaya 1	1000	80	735
PLTGU Cilamaya 2	1000	80	735
PLTGU Grati Gb1.1	150	80	110
PLTGU Grati Gb1.2	150	80	110
PLTGU Grati Gb1.3	150	80	110
PLTGU Grati Sb1.0	250	80	184
PLTGU Grati Sb2.0	187,5	80	138
PLTGU Gresik Gb2.1	150	80	108
PLTGU Gresik Gb2.2	150	80	108
PLTGU Gresik Gb2.3	150	80	108
PLTGU Gresik Gb3.3	150	80	108
PLTGU Gresik Sb 2	250	80	184
PLTGU Gresik Sb 3	250	80	184
PLTGU Jawa 3.1	375	80	275
PLTGU Jawa 3.2	625	80	460
PLTGU M.Tawar 2.0	271,25	80	195
PLTGU M.Tawar 3.0	271,25	80	195
PLTGU M.Tawar 4.0	271,25	80	195
PLTGU M.Tawar Gb1.1	185	80	130
PLTGU M.Tawar Gb1.2	185	80	130
PLTGU M.Tawar Gb1.3	185	80	130
PLTGU M.Tawar Gb2.1	185	80	130
PLTGU M.Tawar Gb2.2	185	80	130
PLTGU M.Tawar Gt5.1	312,5	80	225
PLTGU M.Tawar St1.0	288	80	205
PLTGU M.Tawar St5.0	156,25	80	110
PLTGU Priok	1000	80	735
PLTU Adipala	750	85	585
PLTU Banten	788	85	615
PLTU Bojonegara 1	1176,47	85	900
PLTU Bojonegara 2	1176,47	85	900

Tabel 3.2 Data Pembangkitan Generator Jawa Madura Bali 500 kV (Lanjutan)

Nama Pembangkit	Kapabilitas Pembangkit		Pembangkitan
	MVA	PF (%)	MW
PLTU Cilacap 1	750	85	585
PLTU Cilacap 2	1176,47	85	900
PLTU Cirebon	1176,47	85	900
PLTU Indramayu	1176,47	85	900
PLTU Jateng 1	1176,47	85	900
PLTU Jateng 2	1176,47	85	900
PLTU Paiton 1	473	80	347
PLTU Paiton 2	473	80	347
PLTU Paiton 3	1045	80	770
PLTU Paiton 5	800	80	588
PLTU Paiton 6	800	80	588
PLTU Paiton 7	800	80	588
PLTU Paiton 8	800	80	588
PLTU Paiton 9	800	80	588
PLTU Suralaya 1	500	85	380
PLTU Suralaya 2	500	85	380
PLTU Suralaya 3	500	85	380
PLTU Suralaya 4	500	85	380
PLTU Suralaya 5	750	85	570
PLTU Suralaya 6	750	85	570
PLTU Suralaya 7	750	85	216,396
PLTU Suralaya 9	1176,47	85	900
PLTU Suralaya 10	1176,47	85	900
PLTU Suralaya Baru	735	80	540
PLTU T.Jati 1	802	90	665
PLTU T.Jati 2	802	90	665
PLTU T.Jati 3	802	90	665
PLTU T.Jati 4	802	90	665
PLTU T.Jati 5	1176,47	85	900
PLTU T.Jati 6	1176,47	85	900
PLTU T.Jatia-SS1	825	80	605
PLTU T.Jatia-SS2	825	80	605
PLTU Tanara 1	1176,47	85	900
PLTU Tanara 2	1176,47	85	900

3.2.4 Data Beban Jawa Madura Bali 500 kV

Data beban Jawa Madura Bali 500 kV yang digunakan dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada tabel 3.3 sebagai berikut:

Tabel 3.3 Data Beban Jawa Madura Bali 500 kV

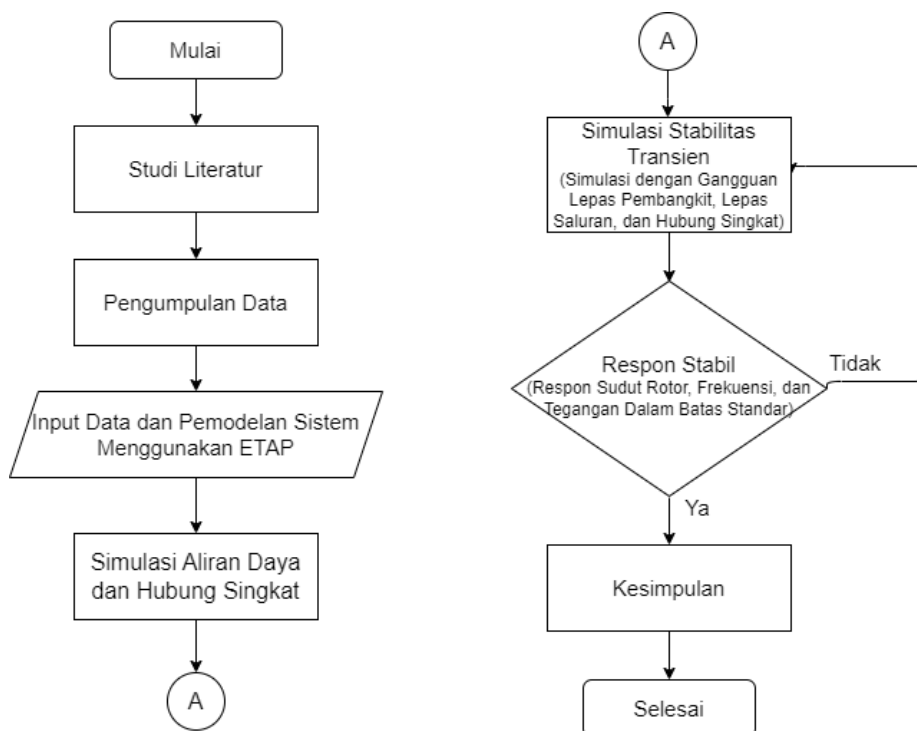
No	Bus GITET	Beban	
		MW	MVAR
1	Antosari	1205,0	583.594
2	Balaraja	1565,3	758.092
3	Bandung Selatan	287,2	139.110
4	Bangil	727,0	352.105
5	Bekasi	604,6	292.848
6	Bogor	369,1	178.785
7	Cawang	1199,8	581.072
8	Cibatu	1394,5	675.382
9	Cibatu 2	570,1	276.121
10	Cibinong	824,7	399.430
11	Cigereleng	612,8	296.798
12	Cikupa	1026,0	496.933
13	Cilegon	681,0	329.832
14	Cililitan	755,9	366.076
15	Cirata	316,2	153.148
16	Deltamas	716,4	346.979
17	Depok	765,2	370.599
18	Duri Kosambi	940,7	455.579
19	Gandul	1899,7	920.066
20	Grati	769,7	372.784
21	Gresik	77,8	37.657
22	Kediri	1232,6	596.959
23	Kembangan	733,4	355.217
24	Kesugihan	1273,9	616.963
25	Krian	1499,8	726.403
26	Lengkong	1076,7	521.476
27	Muara Karang	377,1	182.651
28	Muara Tawar	495,3	239.892
29	Mandirancan	625,5	302.933
30	Ngimbang	846,8	410.105
31	Paiton	894,7	433.303

Tabel 3.3 Data Beban Jawa Madura Bali 500 kV (Lanjutan)

No	Bus GITET	Beban	
		MW	MVAR
32	Pedan	951,4	460.789
33	Pemalang	534,4	258.806
34	Priok	1083,6	524.840
35	Surabaya Selatan	859,8	416.408
36	Suralaya Baru	114,4	55.392
37	Suralaya	48,4	23.451
38	T.Jati	880,8	426.580
39	Tambun	764,1	370.094
40	Tandes	457,3	221.485
41	Tasik	622,7	301.589
42	Tuntang	755,1	365.723
43	U.Berung	612,1	296.461
44	Ungaran	206,4	99.941

3.3 Urutan Pelaksanaan Penelitian

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan guna memperoleh hasil yang diharapkan. Berikut tahapan urutan pengerjaan atau pelaksanaan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.



Gambar 3.2 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir

Pada gambar 3.2, diagram alir yang digunakan pada tugas akhir ini dapat diuraikan dibawah ini:

1. Studi Literatur

Studi literatur bertujuan untuk mengumpulkan teori-teori penunjang yang berkaitan dengan tugas akhir berupa buku, jurnal ilmiah, artikel, internet, dan *database*. Teori-teori penunjang yang dibutuhkan dalam tugas akhir ini seperti analisa sistem tenaga listrik, aliran daya (*load flow*), dan stabilitas sistem tenaga.

2. Pengumpulan Data

Dalam penyusunan tugas akhir ini, diperlukan data – data untuk melakukan pemodelan dan simulasi sistem. Data – data yang dibutuhkan antara lain *single line diagram*, data saluran, data kapasitas pembangkit dan pembangkitan, dan data pembebanan dari sistem kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV.

3. Input Data dan Pemodelan Sistem

Setelah diperoleh data yang diperlukan pada penelitian tugas akhir ini, dilakukan pemodelan sistem di *software* ETAP 19.0.1. Pemodelan sistem kelistrikan Jawa Madura Bali dibuat dalam bentuk satu garis (*single line diagram*).

4. Simulasi Aliran Daya dan Hubung Singkat

Setelah pemodelan sistem di *software* ETAP selesai, dilakukan simulasi aliran daya (*load flow*) sebelum melakukan analisis kestabilan transien sistem. Hal ini dilakukan untuk melihat kondisi awal sistem. Simulasi aliran daya memberikan informasi tentang tegangan, sudut tegangan, dan aliran daya di setiap elemen sistem dalam kondisi *steady state*. Selain itu, analisis ini membantu mengidentifikasi titik-titik kritis dalam sistem, seperti bus dengan tegangan abnormal atau saluran transmisi yang kelebihan beban. Selain itu, simulasi hubung singkat 3 fasa juga dilakukan untuk mengetahui bus mana yang memiliki nilai hubung singkat terbesar.

5. Simulasi Stabilitas Transien

Simulasi transien dilakukan setelah simulasi aliran daya dilakukan. Selanjutnya akan diberikan gangguan pada sistem berupa salah satu pembangkit trip, lepasnya saluran, dan gangguan hubung singkat 3 fasa. Hasil simulasi transien akan dianalisis terkait respon sudut rotor, respon frekuensi, dan respon tegangannya. Perubahan dari setiap respon akan diamati, apakah sistem kembali ke keadaan stabil atau tidak berdasarkan standar yang telah dijadikan acuan.

6. Penyusunan Laporan

Setelah diperoleh kestabilan transien di sistem Jawa Madura Bali akibat penambahan PLTU Suralaya Unit 9-10, dilakukan penarikan kesimpulan dari hasil simulasi dan analisa. Selanjutnya pembuatan laporan dari hasil penelitian tugas akhir ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Studi Kasus Kestabilan Transien

Pada tugas akhir ini, simulasi dan pemodelan sistem dilakukan di *software* ETAP 19.0.1. Setelah dilakukan pemodelan sistem kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV di *software* ETAP 19.0.1, selanjutnya dilakukan beberapa studi kasus. Studi kasus yang dilakukan yaitu gangguan lepasnya pembangkit, lepas satu saluran dari saluran ganda, lepas saluran ganda, dan hubung singkat 3 fasa. Adapun rincian studi kasus yang akan disimulasikan pada tugas akhir ini terdapat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Rincian Studi Kasus Kestabilan Transien Sistem Jawa Madura Bali 500 kV

No	Kasus Gangguan	Deskripsi
1	Lepas Pembangkit	<ol style="list-style-type: none">1. Simulasi pelepasan pembangkit/generator dilakukan saat sebelum dan sesudah penambahan PLTU Suralaya 9&10.2. Generator yang akan dilepas yaitu satu generator yang memiliki kapasitas pembangkitan terbesar.3. Simulasi dilakukan dengan membuka <i>Circuit Breaker</i> yang terhubung ke generator.
2	Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda	<ol style="list-style-type: none">1. Simulasi pelepasan satu saluran dari saluran ganda dilakukan saat sebelum dan sesudah penambahan PLTU Suralaya 9&10.2. Saluran yang dipertimbangkan untuk dilepas yaitu saluran dengan aliran daya terbesar.3. Pelepasan satu saluran dari saluran ganda tanpa adanya gangguan.4. Simulasi dilakukan dengan membuka kedua <i>Circuit Breaker</i> saluran.
3	Lepas Saluran Ganda	<ol style="list-style-type: none">1. Simulasi pelepasan saluran ganda dilakukan saat sebelum dan sesudah penambahan PLTU Suralaya 9&10.2. Saluran yang dipertimbangkan untuk dilepas yaitu saluran dengan aliran daya terbesar.3. Pelepasan satu saluran dari saluran ganda tanpa adanya gangguan.4. Simulasi dilakukan dengan membuka kedua <i>Circuit Breaker</i> saluran.
4	Hubung Singkat 3 Fasa	<ol style="list-style-type: none">1. Simulasi hubung singkat 3 fasa dilakukan saat sebelum dan sesudah penambahan PLTU Suralaya 9&10.2. Menentukan kandidat bus yang akan diuji dengan melihat nilai arus hubung singkat 3 fasa terbesar.3. Melakukan hubung singkat di salah satu saluran yang terhubung ke bus dengan nilai arus hubung singkat 3 fasa terbesar.4. Mencari nilai waktu pemutus kritis <i>Circuit Breaker</i>.

4.1.1 Aliran Daya Saluran Transmisi Jawa Madura Bali 500 kV

Perhitungan aliran daya pada tugas akhir ini dilakukan dengan menggunakan *software* ETAP. Setelah semua data dimasukkan dalam pemodelan sistem, maka dilakukan simulasi aliran daya untuk melihat kondisi awal sistem. Pada studi kasus lepas satu saluran, dilakukan pelepasan satu saluran dari saluran ganda tanpa gangguan untuk melihat kestabilan transien pada sistem. Untuk menentukan saluran mana yang akan dilepas, dilakukan simulasi *loadflow* guna mengetahui saluran yang memiliki aliran daya terbesar. Berikut hasil simulasi *loadflow* dengan 5 saluran yang memiliki aliran daya terbesar:

Tabel 4.2 Data *Loadflow* 5 Saluran dengan Aliran Daya Terbesar Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

No	Dari Bus	Ke Bus	Daya (MW)
1	Suralaya	Balaraja	2921,049
2	Bojonegara	Balaraja	2843,592
3	Balaraja	Lengkong	2587,888
4	Ungaran	Tuntang	2407,076
5	T.Jati	Ungaran	2369,148

Dari hasil simulasi *loadflow*, diperoleh bahwa saluran yang memiliki aliran daya terbesar adalah saluran Suralaya – Balaraja. Maka, saluran Suralaya – Balaraja dipilih untuk dilepas dengan tujuan mengevaluasi kestabilan sistem.

4.1.2 Hubung Singkat 3 Fasa

Pada studi kasus hubung singkat 3 fasa, dilakukan simulasi hubung singkat untuk mengetahui bus mana memiliki nilai hubung singkat terbesar. Lalu akan dipilih saluran yang akan diberikan gangguan berdasarkan bus yang memiliki nilai hubung singkat terbesar. Berikut 5 bus yang memiliki nilai hubung singkat 3 fasa terbesar,

Tabel 4.3 Lima Bus dengan Arus Hubung Singkat 3 Fasa Terbesar Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

No	Bus	Arus Hubung Singkat 3 Fasa (kA)
1	Gandul	160,092
2	M.Tawar	153,965
3	Depok	146,247
4	Bekasi	132,831
5	Kembangan	129,368

Dari tabel 4.3, bus yang memiliki nilai arus hubung singkat terbesar yaitu bus Gandul dengan arus hubung singkat sebesar 160,092 kA. Arus gangguan hubung singkat 3 fasa yang mengalir ke bus Gandul adalah hasil dari kontribusi arus dari berbagai peralatan yang ada dalam sistem seperti generator dan transformator. Berikut adalah rincian kontribusi arus yang menuju ke bus Gandul yaitu:

Tabel 4.4 Arus Kontribusi Hubung Singkat 3 Fasa di Bus Gandul

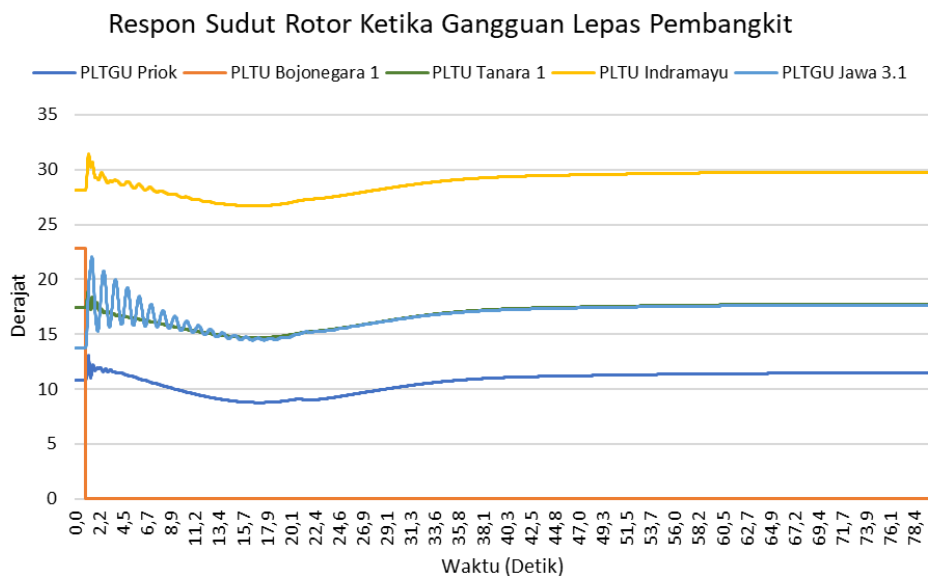
No	Sumber Arus Kontribusi		Arus Kontribusi (kA)
1	Bus	Kembangan	30,470
2		Depok	50,426
3		Lengkong	30,216
4		Cililitan	31,557
5	Beban	Gandul	17,427

4.2 Simulasi Studi Kasus Kestabilan Transien

4.2.1 Studi Kasus 1 : Lepas Pembangkit

Stabilitas merupakan aspek krusial dalam menjaga keandalan dan kontinuitas operasional sistem tenaga listrik. Gangguan besar seperti lepasnya generator dapat menyebabkan ketidakseimbangan mendadak antara suplai daya dan konsumsi daya, yang berdampak terhadap stabilitas sistem. Analisis pertama mengenai gangguan lepasnya pembangkit Bojonegara Unit 1 membahas permasalahan yang timbul akibat sistem kehilangan suplai daya. PLTU Bojonegara Unit 1 dipilih untuk dilepas karena merupakan salah satu pembangkit dengan daya pembangkitan terbesar di sistem. Analisis ini akan difokuskan pada tiga parameter, yaitu respon sudut rotor generator, respon frekuensi bus, dan respon tegangan bus.

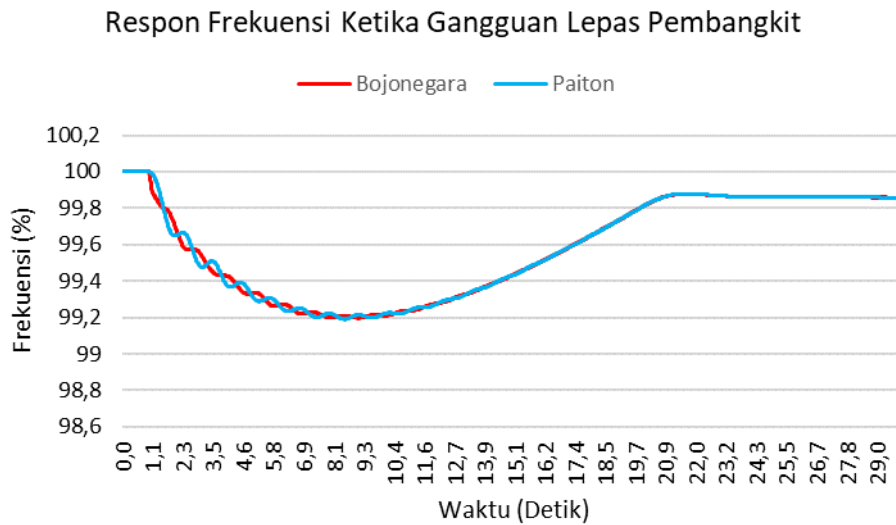
4.2.1.1 Hasil Simulasi Lepas Pembangkit Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10



Gambar 4.1 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Pembangkit Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

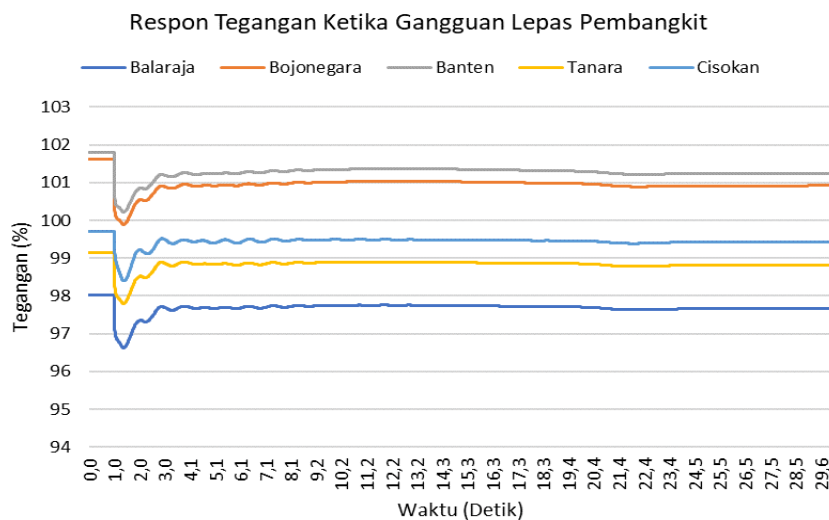
Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, ketika Bojonegara Unit 1 lepas pada $t=1$ detik, sudut rotor mengalami osilasi yang cukup signifikan dan membutuhkan waktu cukup lama untuk meredam osilasi tersebut. Respon sudut rotor dari lepasnya Bojonegara Unit 1 dapat dilihat pada gambar 4.1. Pada detik ke-1, sudut rotor Bojonegara Unit 1 yang mengalami

gangguan langsung turun ke 0°. Selanjutnya, sudut rotor Indramayu dan Priok mengalami perubahan dari masing – masing nilai awal yaitu 28,16° dan 10,77°, lalu stabil di 29,77° dan 11,45°.



Gambar 4.2 Respon Frekuensi Ketika Lepas Pembangkit Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

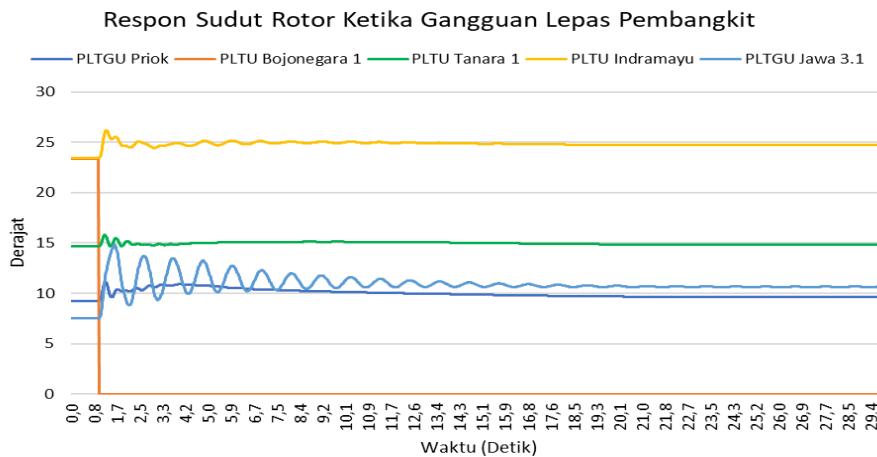
Pada respon frekuensi, frekuensi pada semua bus mengalami penurunan yang disebabkan oleh ketidakseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan daya yang dikonsumsi. Governor pada generator akan merespon perubahan ini dengan meningkatkan input daya mekanis untuk menstabilkan nilai frekuensi sistem. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.2 yang memperlihatkan terjadinya penurunan frekuensi di bus sistem. Pada bus gangguan yaitu bus Bojonegara, terjadi penurunan hingga mencapai 99,197% dan kemudian naik hingga *steady state* di 99,858%.



Gambar 4.3 Respon Tegangan Ketika Lepas Pembangkit Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

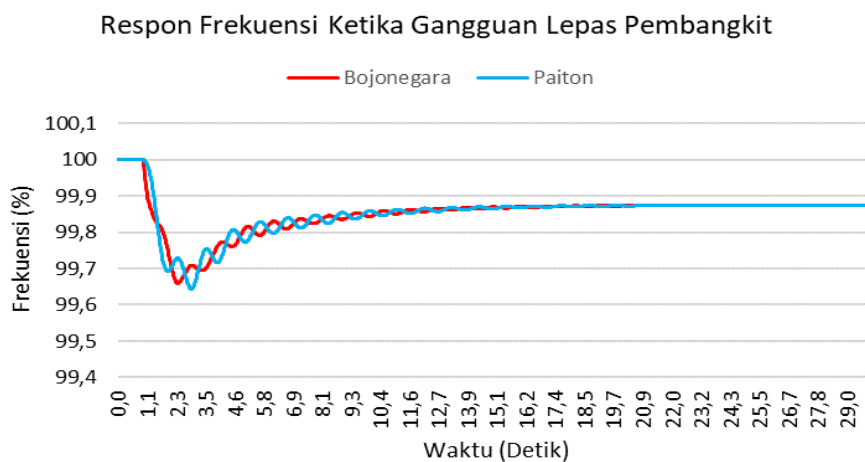
Pada respon tegangan, bus-bus di sistem mengalami penurunan karena sistem kehilangan daya reaktif sementara akibat lepasnya generator Bojonegara Unit 1. Sistem kontrol *Automatic Voltage Regulator (AVR)* pada generator akan berusaha mengimbangi perubahan ini untuk menjaga tegangan sistem. Dari gambar 4.3, nilai tegangan awal dari bus Bojonegara adalah 101,62% dan mengalami penurunan tegangan hingga 99,89%, kemudian beresilasi dan stabil di 100,92%. Pada bus Balaraja, saat terjadi gangguan, nilai tegangannya turun dari 98,03% ke 96,62%, lalu beresilasi dan stabil di 97,66%.

4.2.1.2 Hasil Simulasi Lepas Pembangkit Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10



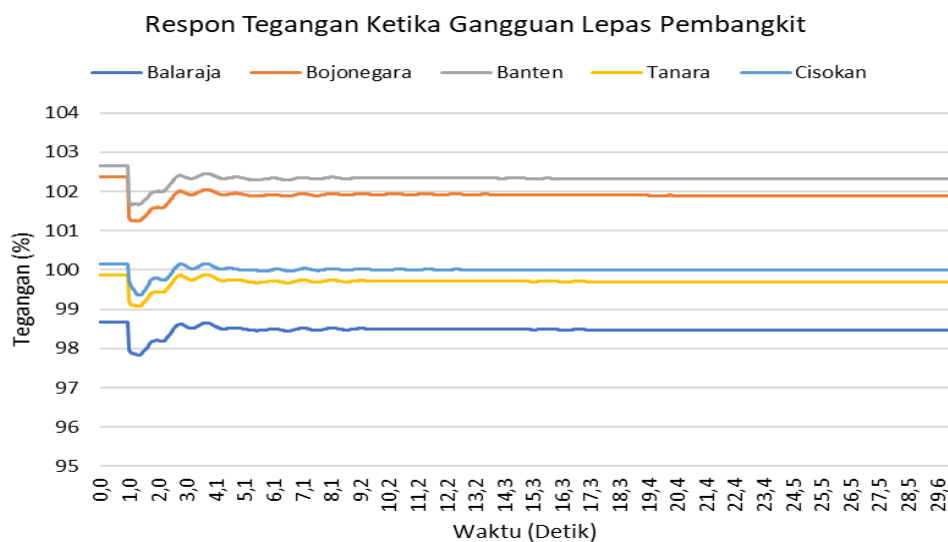
Gambar 4.4 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Pembangkit Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, ketika Bojonegara Unit 1 lepas pada $t=1$ detik, terjadi osilasi dan peningkatan sudut rotor yang relatif kecil sehingga sistem dapat kembali ke kondisi *steady state*. Respon sudut rotor dari lepasnya Bojonegara Unit 1 dapat dilihat pada gambar 4.4. Pada detik ke-1, sudut rotor Bojonegara Unit 1 yang mengalami gangguan langsung turun ke 0° . Selanjutnya, sudut rotor Indramayu mengalami perubahan dari nilai awal $23,4^\circ$ dan stabil di $24,71^\circ$.



Gambar 4.5 Respon Frekuensi Ketika Lepas Pembangkit Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada respon frekuensi, frekuensi pada semua bus mengalami penurunan yang disebabkan oleh ketidakseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan daya yang dikonsumsi, sehingga mengakibatkan penurunan frekuensi secara langsung. Governor pada generator akan merespon perubahan ini dengan meningkatkan input daya mekanis untuk menstabilkan nilai frekuensi sistem. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.5 yang memperlihatkan terjadinya penurunan frekuensi di bus sistem. Pada bus Bojonegara, terjadi penurunan hingga mencapai 99,66% dan kemudian naik hingga *steady state* di 99,87%.



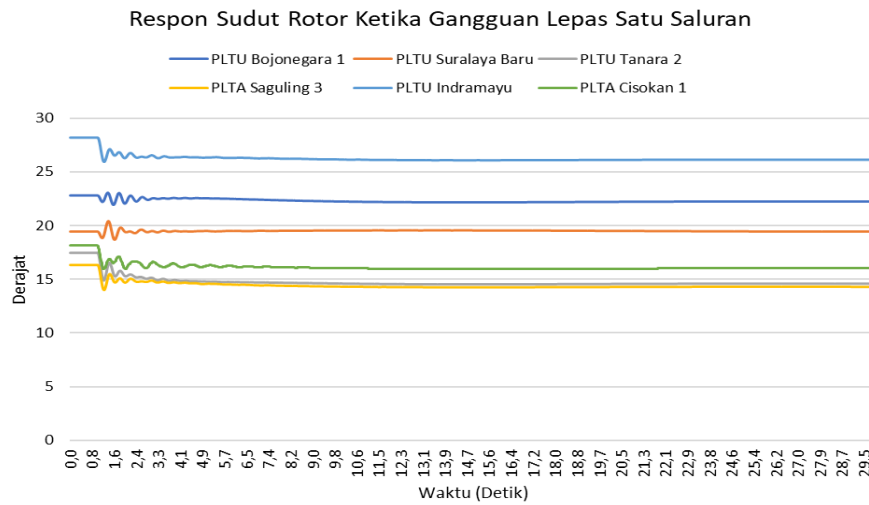
Gambar 4.6 Respon Tegangan Ketika Lepas Pembangkit Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada respon tegangan, bus-bus di sistem mengalami penurunan karena sistem kehilangan daya reaktif sementara akibat lepasnya generator Bojonegara Unit 1. Sistem kontrol *Automatic Voltage Regulator (AVR)* pada generator akan berusaha mengimbangi perubahan ini untuk menjaga tegangan sistem. Dari gambar 4.6, nilai tegangan awal dari bus Bojonegara adalah 103,28% dan mengalami penurunan tegangan hingga 101,24%, kemudian beresilasi dan stabil di 101,89%. Pada bus Balaraja, saat terjadi gangguan, nilai tegangannya turun dari 98,67% ke 97,83%, lalu beresilasi dan stabil di 98,47%.

4.2.2 Studi Kasus 2 : Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda

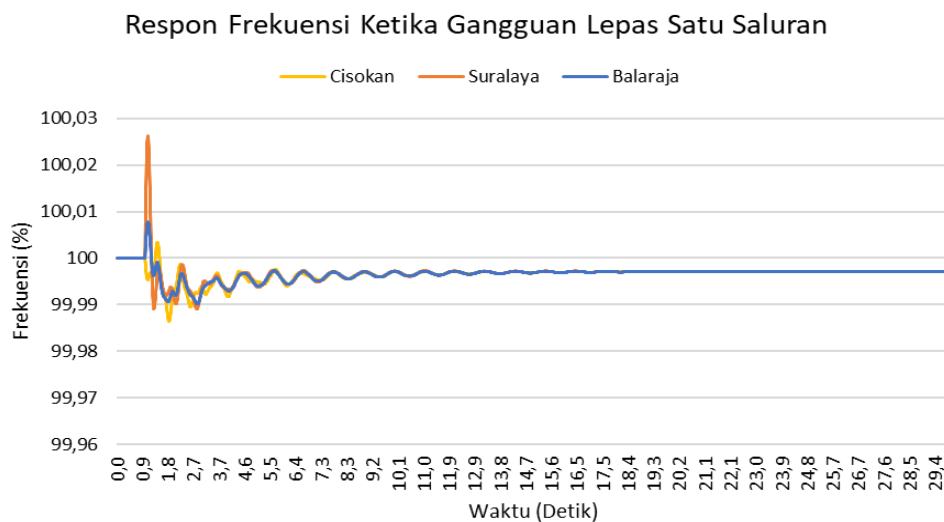
Pada studi kasus pelepasan satu saluran dari saluran ganda, akan dibahas mengenai analisis stabilitas transien sistem Jawa Madura Bali dengan melihat respon sudut rotor, frekuensi, dan tegangan. Untuk menentukan saluran mana yang akan dilepas, dilakukan simulasi *loadflow* guna mengetahui saluran yang memiliki aliran daya terbesar. Dari hasil simulasi *loadflow* yang dapat dilihat pada Tabel 4.2, diperoleh bahwa saluran yang memiliki aliran daya terbesar adalah saluran Suralaya – Balaraja. Oleh karena itu, saluran Suralaya – Balaraja dipilih untuk dilepas dengan tujuan mengevaluasi kestabilan sistem. Simulasi pelepasan satu saluran dari saluran ganda dilakukan dengan membuka CB (*Circuit Breaker*) saluran di bus Suralaya dan bus Balaraja pada detik ke-1.

4.2.2.1 Hasil Simulasi Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10



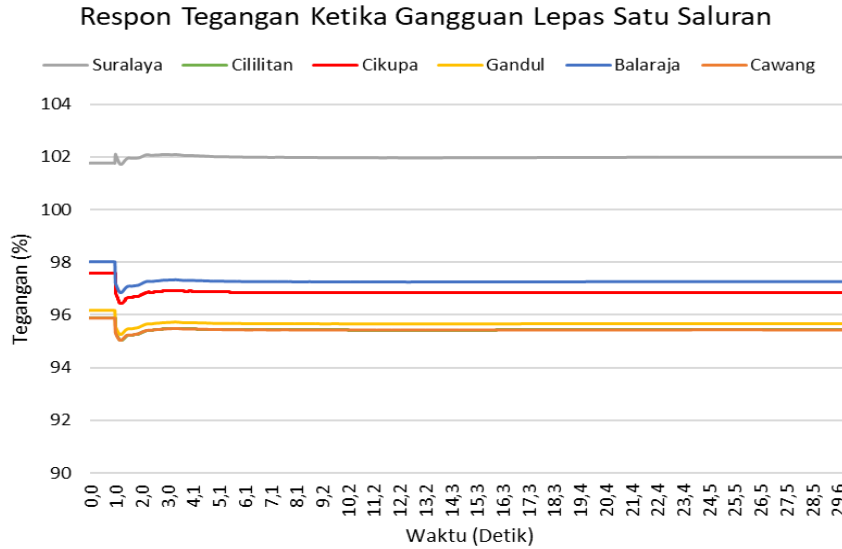
Gambar 4.7 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada kondisi gangguan lepas satu saluran dari saluran ganda Suralaya – Balaraja, sistem masih dalam keadaan stabil. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.7, di mana sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi dan kembali ke keadaan *steady state*. Hampir semua generator mengalami respon yang sama, yaitu penurunan sementara sudut rotor, osilasi, dan akhirnya sedikit meningkat menuju keadaan *steady state*. Pada generator Cisokan Unit 1, terjadi perubahan sudut rotor dari $18,12^\circ$ ke $15,934^\circ$, kemudian berosilasi dan stabil di $15,99^\circ$.



Gambar 4.8 Respon Frekuensi Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

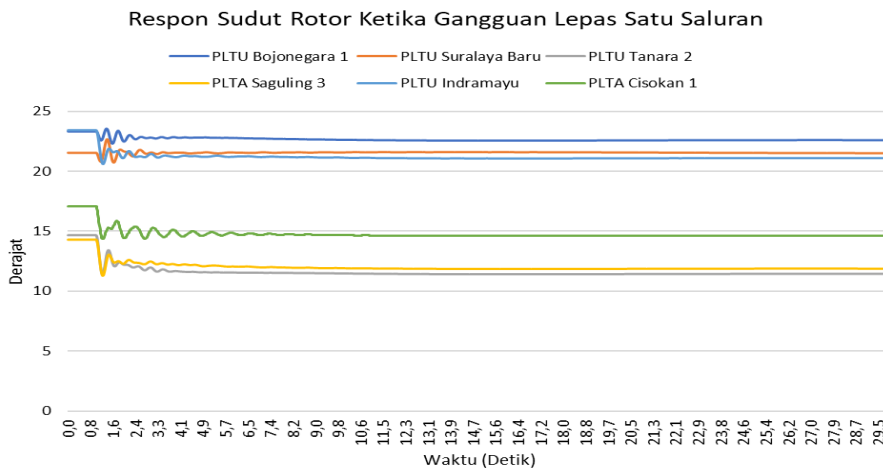
Pada gambar 4.8, frekuensi sistem masih dalam batas aman karena hanya mengalami osilasi yang sangat kecil. Gangguan lepas satu saluran dari saluran ganda Suralaya – Balaraja tidak terlalu berpengaruh terhadap kestabilan sistem. Frekuensi bus Balaraja mengalami osilasi kecil dan *steady state* di 99,99%.



Gambar 4.9 Respon Tegangan Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.9, dapat terlihat bahwa setelah terjadi gangguan lepas satu saluran dari saluran ganda Suralaya – Balaraja, tegangan sistem mengalami penurunan, kemudian naik dan beresilasi menuju titik konvergennya. bus Cikupa mengalami penurunan dari 97,59% ke 96,42%, kemudian beresilasi dan mencapai *steady state* di 96,85%. Begitu juga dengan bus Cawang yang mengalami perubahan dari 95,89% dan stabil di 95,47%.

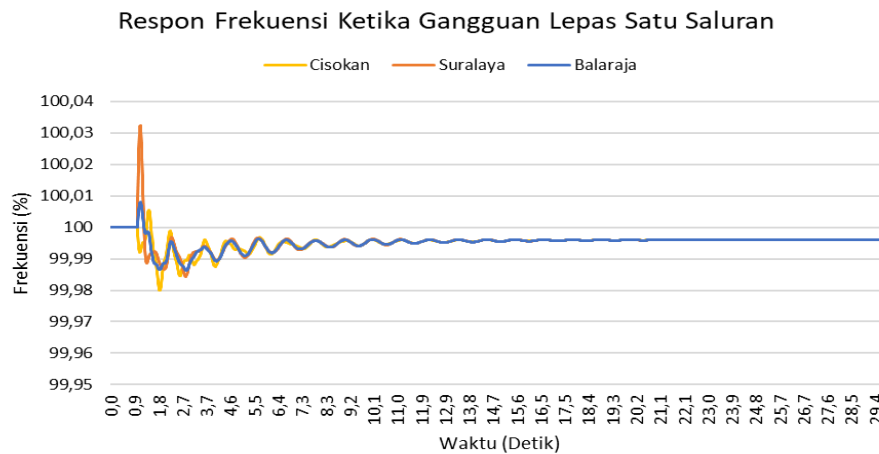
4.2.2.2 Hasil Simulasi Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10



Gambar 4.10 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

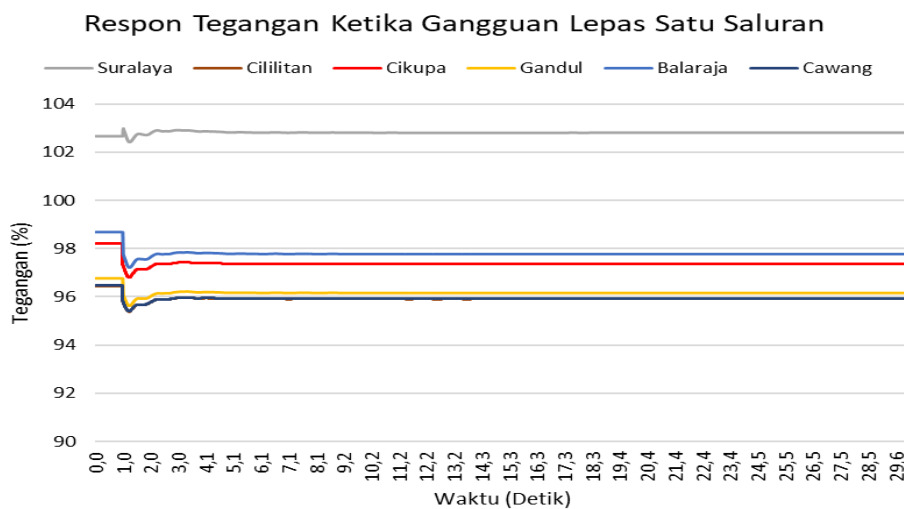
Pada kondisi gangguan lepas satu saluran dari saluran ganda Suralaya – Balaraja, sistem masih dalam keadaan stabil. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.10, di mana sudut rotor pada semua generator mengalami osilasi dan kembali ke keadaan *steady state*. Hampir semua generator mengalami respon yang sama, yaitu penurunan sementara sudut rotor, osilasi, dan

akhirnya sedikit meningkat menuju keadaan *steady state*. Pada generator Cisokan Unit 1, terjadi perubahan sudut rotor dari $17,09^\circ$ ke $14,34^\circ$, kemudian berosilasi dan stabil di $14,61^\circ$.



Gambar 4.11 Respon Frekuensi Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.11, frekuensi sistem masih dalam batas aman karena hanya mengalami osilasi yang sangat kecil. Gangguan lepas satu saluran dari saluran ganda tidak terlalu berpengaruh terhadap kestabilan sistem. Frekuensi bus Balaraja mengalami osilasi kecil dan *steady state* di 99,99%.



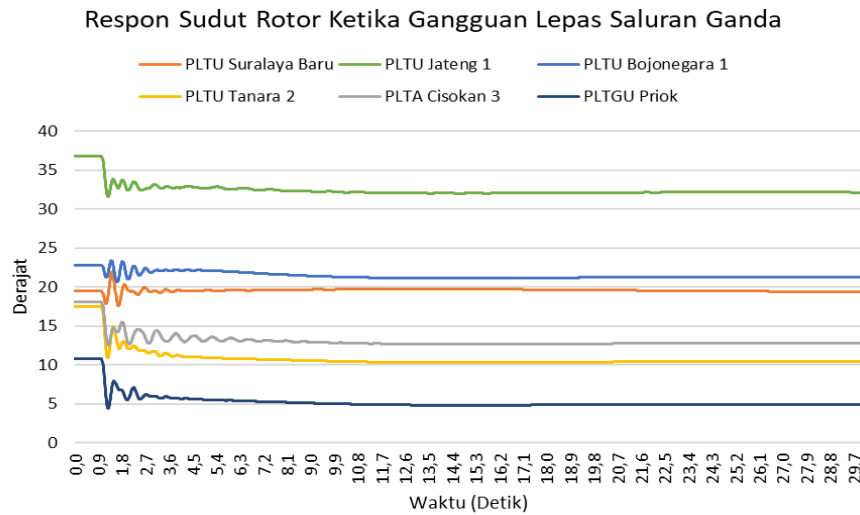
Gambar 4.12 Respon Tegangan Ketika Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.12, dapat terlihat bahwa setelah terjadi gangguan lepas satu saluran dari saluran ganda, tegangan sistem mengalami penurunan, kemudian naik dan berosilasi menuju titik konvergenya. Bus Cikupa mengalami penurunan dari 98,22% ke 96,8%, kemudian berosilasi dan mencapai *steady state* di 97,36%. Penurunan ini disebabkan oleh berkurangnya aliran daya reaktif yang menuju ke bus Cikupa. Maka, sistem kontrol tegangan (AVR) mulai bekerja untuk meningkatkan tegangan.

4.2.3 Studi Kasus 3 : Lepas Saluran Ganda

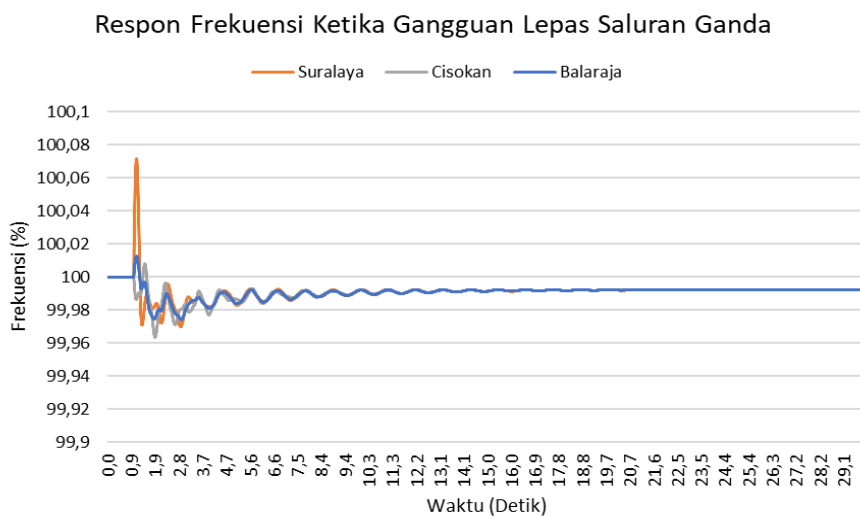
Pada studi kasus lepas saluran Ganda dilakukan pelepasan saluran transmisi yang memiliki aliran daya terbesar. Dari tabel 4.2, saluran yang akan dilepas yaitu saluran Suralaya – Balaraja yang memiliki nilai aliran daya terbesar. Pada simulasi transien ini, saluran ganda Suralaya – Balaraja akan dilepas pada saat $t = 1$ detik tanpa adanya gangguan.

4.2.3.1 Hasil Simulasi Lepas Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10



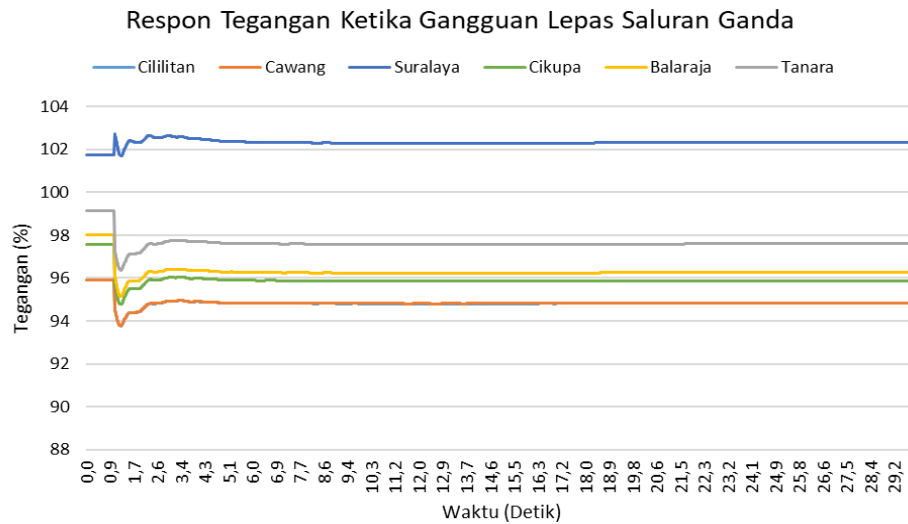
Gambar 4.13 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada kondisi gangguan lepasnya saluran ganda antara Suralaya – Balaraja, semua sudut rotor generator mengalami osilasi. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.13, di mana sudut rotor generator Tanara unit 2 mengalami penurunan dari nilai awal sudut rotor sebesar $17,46^\circ$, kemudian beresilasi dan mencapai *steady state* pada nilai $10,41^\circ$. Pada generator Priok, sudut rotor awalnya adalah $10,77^\circ$ dan juga mengalami osilasi, stabil di nilai $4,94^\circ$.



Gambar 4.14 Respon Frekuensi Ketika Lepas Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

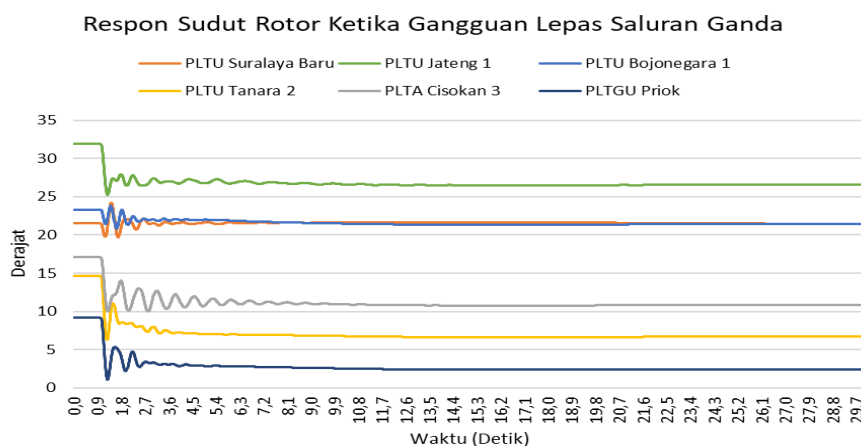
Respon frekuensi dalam sistem tenaga listrik terhadap gangguan lepas saluran ganda tidak menunjukkan dampak signifikan yang mengancam stabilitas. Dari gambar 4.14, dapat dilihat bahwa frekuensi pada bus Balaraja mengalami osilasi yang kemudian mencapai *steady state* di 99,99%. Sementara itu, pada bus Suralaya, terlihat bahwa saat saluran ganda dilepas, frekuensi mengalami kenaikan hingga 100,072% sebelum akhirnya turun kembali dan mencapai *steady state* di 99,99%.



Gambar 4.15 Respon Tegangan Ketika Lepas Saluran Ganda Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

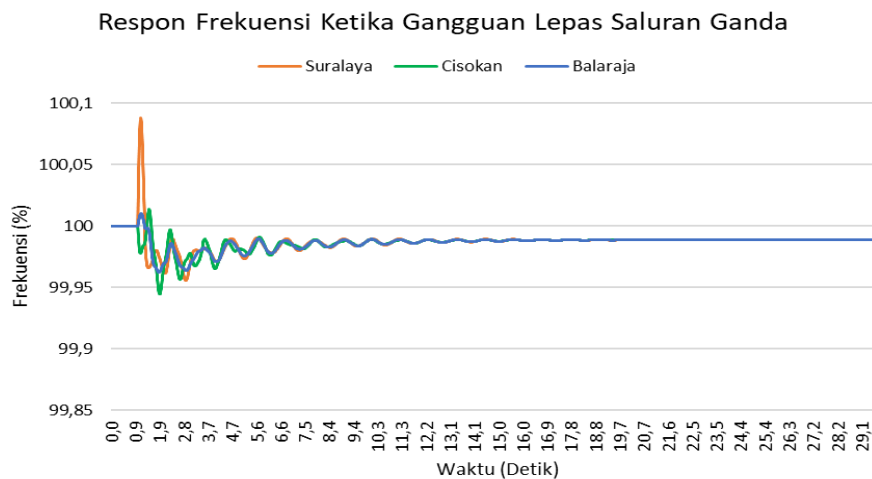
Pada gambar 4.15, respons tegangan bus menunjukkan penurunan dari nilai tegangan *steady state*. Bus Balaraja, yang merupakan bus terdekat dengan sumber gangguan, mengalami penurunan tegangan dari 98,03 ke 95,13%, kemudian berosilasi sebelum mencapai *steady state* di 96,25%. Selain itu, bus Cawang dan bus Cililitan juga mengalami perubahan dari nilai awal masing – masing yaitu 95,89% dan 95,88%, lalu mencapai *steady state* masing – masing di 94,82% dan 94,81%.

4.2.3.2 Hasil Simulasi Lepas Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10



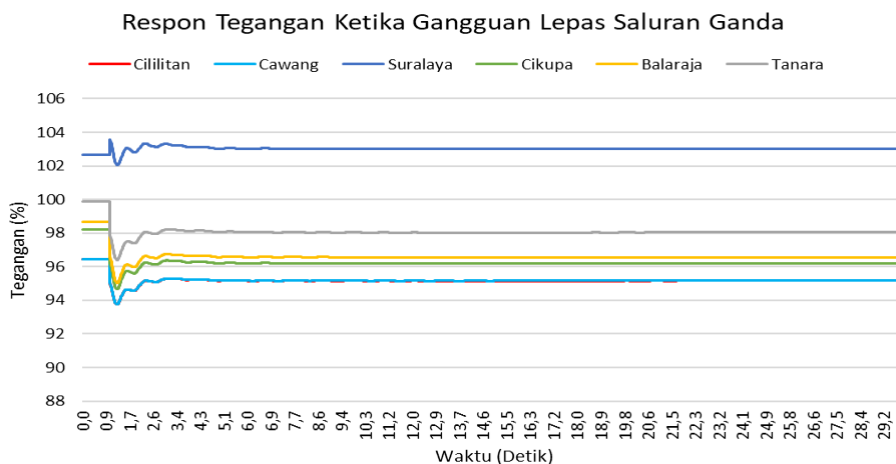
Gambar 4.16 Respon Sudut Rotor Ketika Lepas Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada kondisi gangguan lepasnya saluran ganda antara Suralaya – Balaraja, semua sudut rotor generator mengalami osilasi. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.16, di mana sudut rotor generator Tanara unit 2 mengalami penurunan dari nilai awal sudut rotor sebesar $14,68^\circ$, kemudian berosilasi dan mencapai *steady state* pada nilai $6,69^\circ$. Pada generator Priok, sudut rotor awalnya adalah $9,19^\circ$ dan juga mengalami osilasi, stabil di nilai $2,43^\circ$. Perubahan dan osilasi dalam respon sudut rotor akibat pelepasan saluran tetap stabil di bawah 90° . Maka dapat disimpulkan bahwa sistem masih stabil.



Gambar 4.17 Respon Frekuensi Ketika Lepas Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Respon frekuensi dalam sistem tenaga listrik terhadap gangguan lepas saluran ganda tidak menunjukkan dampak signifikan yang mengancam stabilitas operasional. Dari gambar 4.17, dapat dilihat bahwa frekuensi pada bus Balaraja mengalami osilasi yang kemudian mencapai *steady state* di 99,98%. Sementara itu, pada bus Suralaya, terlihat bahwa saat saluran ganda dilepas, frekuensi mengalami kenaikan hingga 100,088% sebelum akhirnya turun kembali dan mencapai *steady state* di 99,98%.



Gambar 4.18 Respon Tegangan Ketika Lepas Saluran Ganda Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

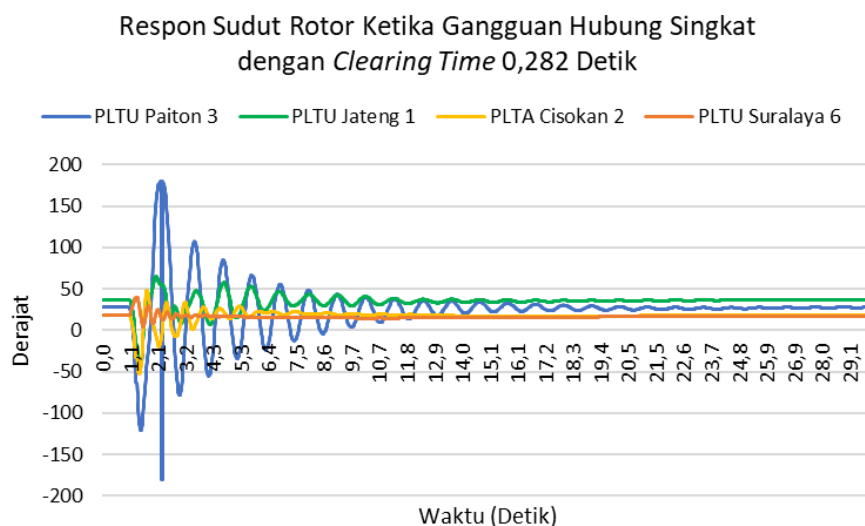
Pada gambar 4.18, respons tegangan bus menunjukkan penurunan dari nilai tegangan steady state. Bus Balaraja, yang merupakan bus terdekat dengan sumber gangguan, mengalami penurunan tegangan dari 98,67% ke 95,03%, kemudian beresilasi sebelum mencapai *steady state* di 96,57%. Penurunan tegangan juga terjadi di bus Cawang dan bus Cililitan yang mana mengalami perubahan dari nilai awal masing – masing yaitu 96,46% dan 96,45%, lalu mencapai *steady state* masing – masing di 95,17% dan 95,16%. Penurunan tegangan pada bus Balaraja, Cawang, dan Cililitan disebabkan oleh putusnya aliran daya dari bus Suralaya, mengakibatkan berkurangnya aliran daya reaktif ke bus-bus tersebut.

4.2.4 Studi Kasus 4 : Hubung Singkat 3 Fasa

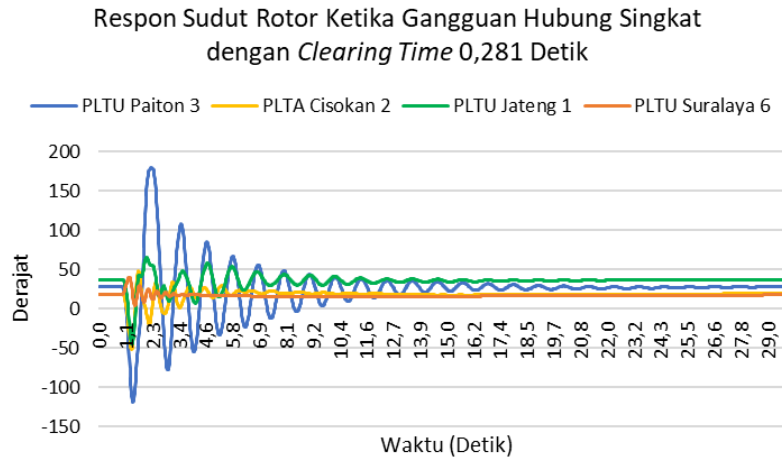
Pada kasus hubung singkat 3 fasa, dilakukan pencarian waktu kritis pemutusan akibat gangguan hubung singkat 3 fasa. Percobaan dilakukan pada bus dengan arus hubung singkat 3 fasa terbesar. Tujuan dari studi kasus hubung singkat ini yaitu menemukan waktu kritis pemutusan untuk mengatasi gangguan dengan menggunakan metode simulasi domain waktu. Analisis berfokus pada sudut rotor domain waktu, sudut rotor dianggap stabil jika nilai ayunan sudut rotor tidak melebihi 180° dan *steady state* dibawah 90° . Selain itu, evaluasi juga dilakukan terhadap perubahan frekuensi sesuai dengan standar IEEE Std C37.106-2003. Frekuensi dianggap aman dalam kondisi transien jika tetap berada dalam rentang 47 Hz – 51,417 Hz (94% - 102,834%).

Berdasarkan tabel 4.3 dan tabel 4.4, dilakukan simulasi gangguan hubung singkat di saluran Gandul – Depok pada t=1 detik. Untuk menentukan waktu trip *Circuit Breaker* (CB), digunakan metode *trial and error* dengan mengatur waktu pemutusan yang tepat agar sistem tetap stabil. Penentuan waktu trip CB dilakukan dengan mempertimbangkan respon sudut rotor, frekuensi, dan tegangan yang masih berada dalam batas standar yang telah ditetapkan.

4.2.4.1 Hasil Simulasi Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10



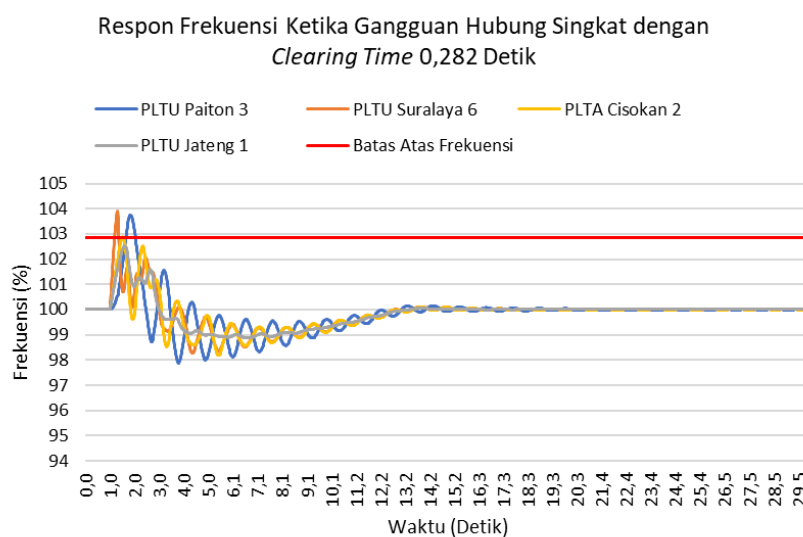
Gambar 4.19 Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,282 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10



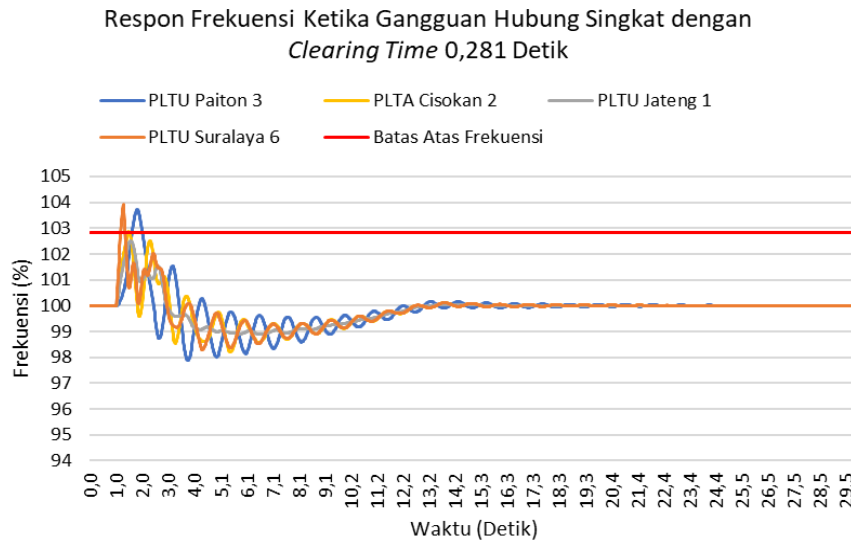
Gambar 4.20 Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,281 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.19, semua sudut rotor generator mengalami osilasi. Namun, pada sudut rotor generator PLTU Paiton 3 mengalami osilasi yang besar dengan durasi waktu yang sangat cepat. Saat waktu $t = 2,223$ detik, sudut rotor berada pada nilai $179,893^\circ$. Lalu saat waktu $t = 2,243$ detik, sudut rotor berada pada nilai $-179,783^\circ$. Osilasi yang sangat tinggi hingga mendekati 180° dalam waktu singkat ini sangat berbahaya yang bisa menyebabkan generator *slipping pole*. Peningkatan sudut rotor generator yang tinggi hingga melewati batas stabilitasnya (180°) bisa menyebabkan generator lepas sinkron.

Setelah mengevaluasi respon sudut rotor, selanjutnya adalah memeriksa respon frekuensi dari semua generator. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa frekuensi tetap berada dalam batas yang sesuai dengan standar frekuensi abnormal. Batas frekuensi maksimal saat gangguan tidak boleh melebihi batas frekuensi yang dilarang (*prohibited operation*) sesuai dengan standar IEEE Std C37.106-2003, yaitu 102,834%.

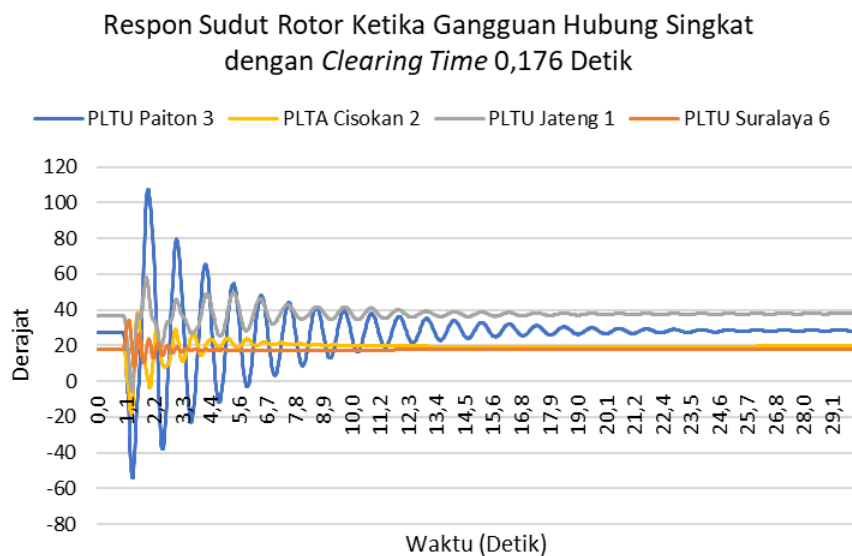


Gambar 4.21 Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,282 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

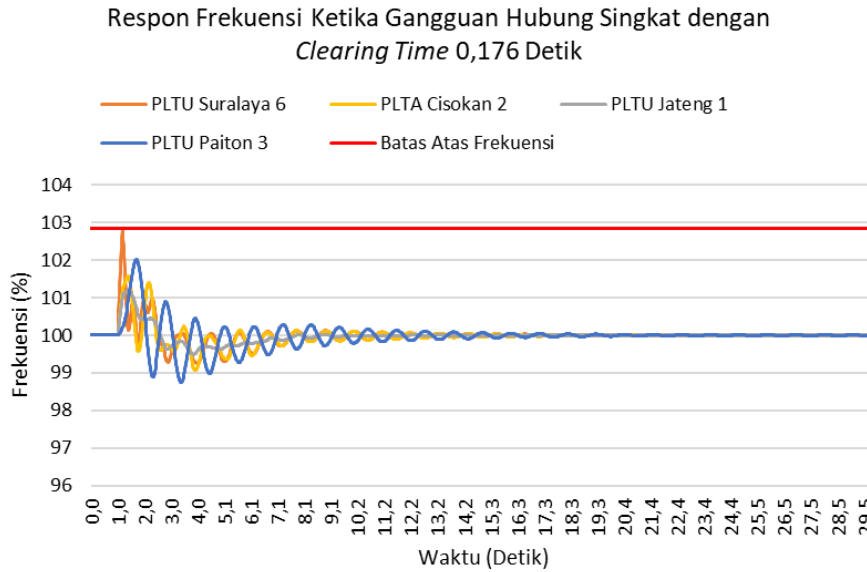


Gambar 4.22 Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,281 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.21 dan gambar 4.22, terdapat generator yang mengalami osilasi dan beroperasi melebihi batas frekuensi yang diizinkan. Pada waktu buka CB 0,282 detik dan 0,281 detik, frekuensi tertinggi PLTU Paiton 3 berturut – turut adalah 103,754% dan 103,733%. Berdasarkan standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003, operasi frekuensi dari generator dengan waktu buka CB 0,282 detik dan 0,281 detik berada pada range yang tidak aman. Maka perlu dicari waktu buka CB baru agar sistem masih dalam keadaan stabil dan beroperasi dalam batas yang diizinkan.



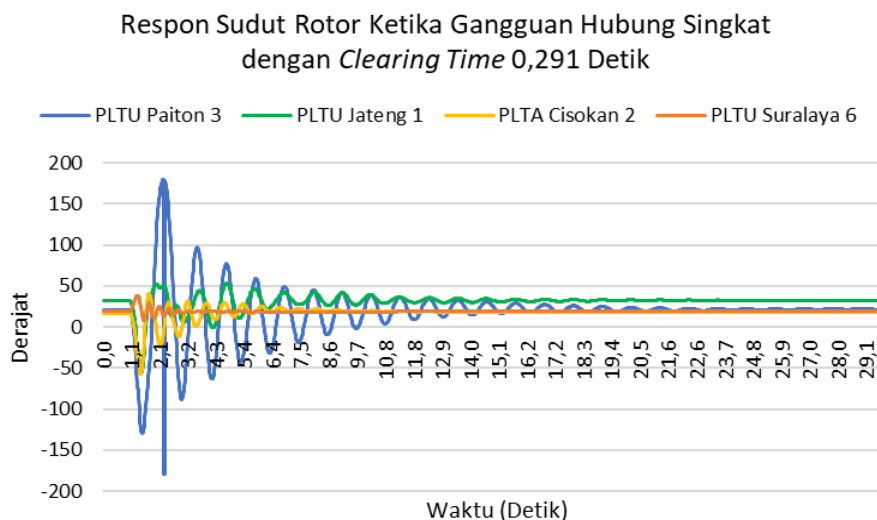
Gambar 4.23 Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,176 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10



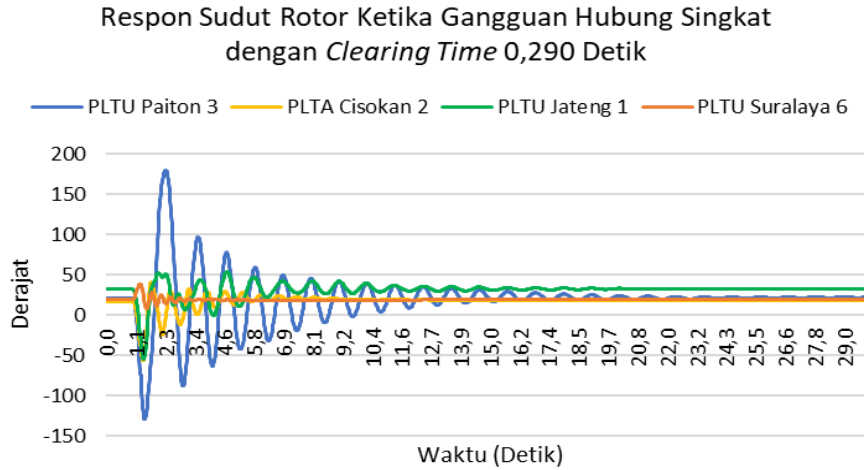
Gambar 4.24 Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,176 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.23 semua sudut rotor generator mengalami osilasi, osilasi sudut rotor terbesar dialami oleh generator PLTU Paiton 3 dengan nilai terendah $-53,93^\circ$ dan nilai tertinggi adalah $107,21^\circ$. Lalu sudut rotor generator PLTU Paiton 3 *steady state* di $28,18^\circ$ ($<90^\circ$), sehingga sudut rotor masih dalam keadaan stabil. Pada gambar 4.24, semua frekuensi dari generator berada didalam batas yang diizinkan yaitu dibawah 102,834%. Setelah mengevaluasi hasil respon sudut rotor dan frekuensi dengan waktu buka CB 0,176 detik, dapat disimpulkan sistem masih dalam keadaan stabil.

4.2.4.2 Hasil Simulasi Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10



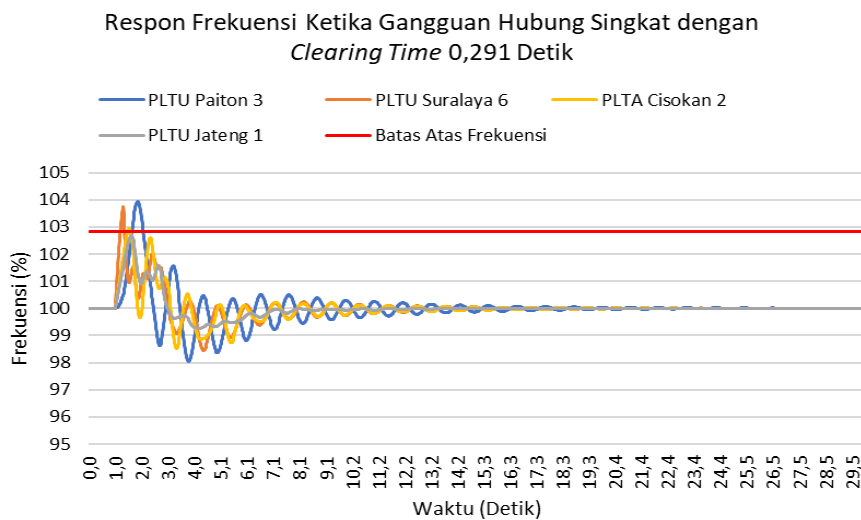
Gambar 4.25 Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,291 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10



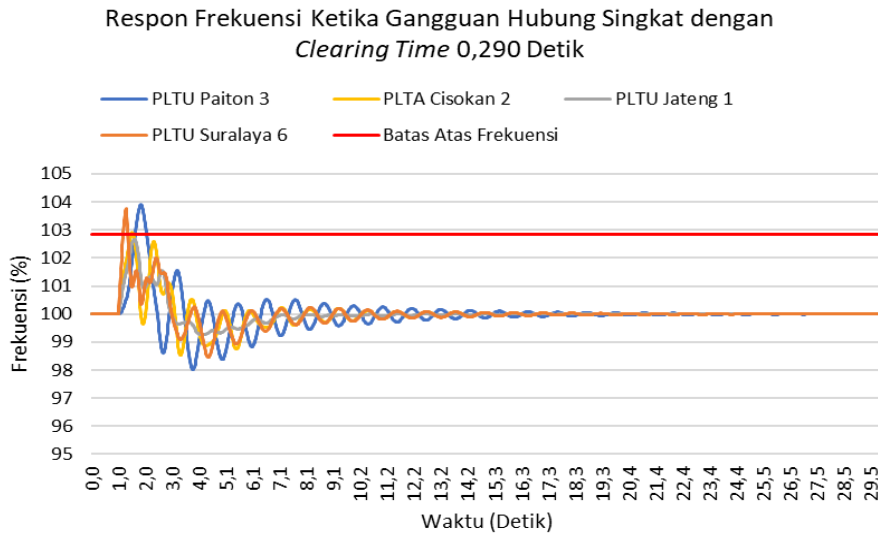
Gambar 4.26 Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,290 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.25, semua sudut rotor generator mengalami osilasi. Namun, pada sudut rotor generator PLTU Paiton 3 mengalami osilasi yang besar dengan durasi waktu yang sangat cepat. Saat waktu $t = 2,252$ detik, sudut rotor berada pada nilai $179,97^\circ$. Lalu saat waktu $t = 2,272$ detik, sudut rotor berada pada nilai $-179,605^\circ$. Osilasi yang sangat tinggi hingga mendekati 180° dalam waktu singkat ini sangat berbahaya yang bisa menyebabkan generator *slipping pole*. Peningkatan sudut rotor generator yang tinggi hingga melewati batas stabilitasnya (180°) bisa menyebabkan generator lepas sinkron.

Setelah mengevaluasi respon sudut rotor, selanjutnya adalah memeriksa respon frekuensi dari semua generator. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa frekuensi tetap berada dalam batas yang sesuai dengan standar frekuensi abnormal. Batas frekuensi maksimal saat gangguan tidak boleh melebihi batas frekuensi yang dilarang (*prohibited operation*) sesuai dengan standar IEEE Std C37.106-2003, yaitu 102,834%.

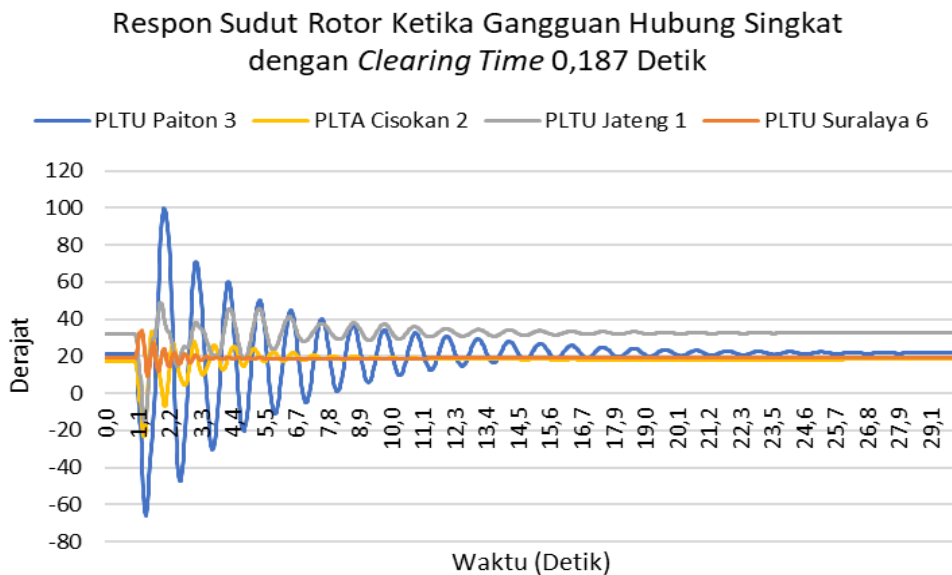


Gambar 4.27 Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,291 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

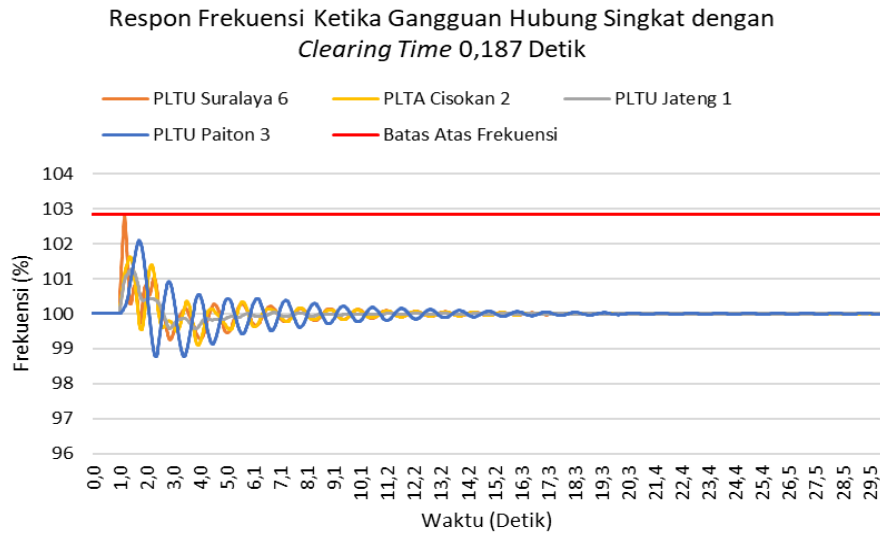


Gambar 4.28 Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,290 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.27 dan gambar 4.28, terdapat generator yang mengalami osilasi dan beroperasi melebihi batas frekuensi yang diizinkan. Pada waktu buka CB 0,291 detik dan 0,290 detik, frekuensi tertinggi PLTU Paiton 3 berturut – turut adalah 103,923% dan 103,904%. Berdasarkan standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003, operasi frekuensi dari generator dengan waktu buka CB 0,291 detik dan 0,290 detik berada pada range yang tidak aman. Maka perlu dicari waktu buka CB baru agar sistem masih dalam keadaan stabil dan beroperasi dalam batas yang diizinkan.



Gambar 4.29 Respon Sudut Rotor dengan Waktu Buka CB 0,187 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10



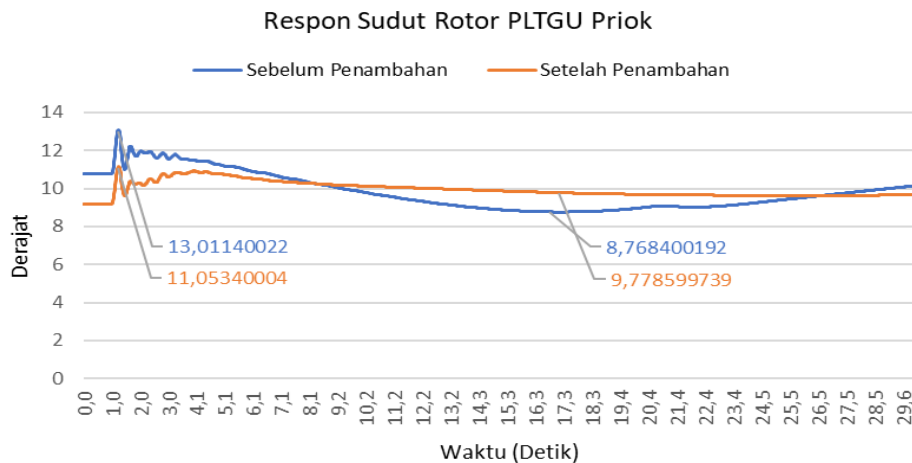
Gambar 4.30 Respon Frekuensi dengan Waktu Buka CB 0,187 Detik Ketika Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Pada gambar 4.29 semua sudut rotor generator mengalami osilasi, osilasi sudut rotor terbesar dialami oleh generator PLTU Paiton 3 dengan nilai terendah $-65,82^\circ$ dan nilai tertinggi adalah $99,51^\circ$. Lalu sudut rotor generator PLTU Paiton 3 *steady state* di $21,72^\circ (<90^\circ)$, sehingga sudut rotor masih dalam keadaan stabil. Pada gambar 4.30, semua frekuensi dari generator berada didalam batas yang diizinkan yaitu dibawah 102,834%. Setelah mengevaluasi hasil respon sudut rotor dan frekuensi dengan waktu buka CB 0,187 detik, dapat disimpulkan sistem masih dalam keadaan stabil.

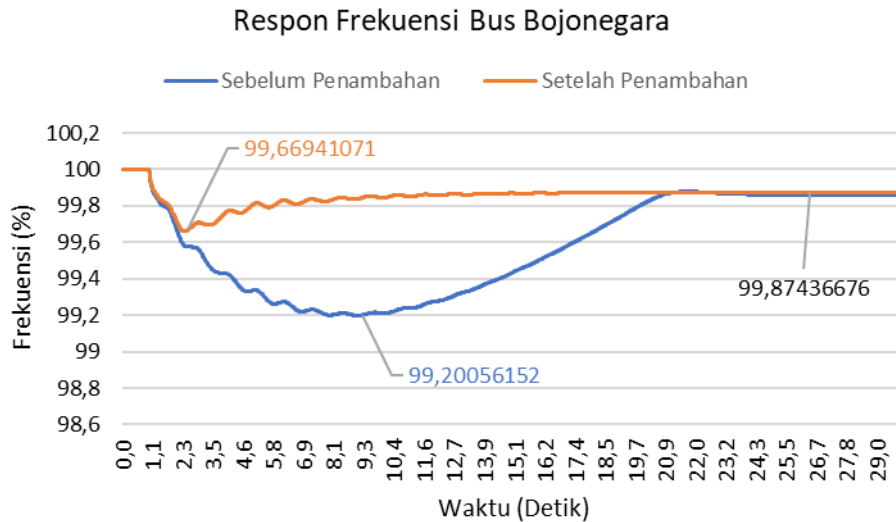
4.3 Analisis Hasil Simulasi

Untuk memudahkan proses analisis hasil simulasi, dilakukan perbandingan data hasil pada setiap studi kasus yang sesuai dengan tabel 4.1. Data yang akan dibandingkan dibagi berdasarkan respon pembangkit terdekat dan bus yang telah dijadikan acuan dalam studi transien, dengan mempertimbangkan kondisi sebelum dan sesudah PLTU Suralaya 9&10 masuk ke dalam sistem.

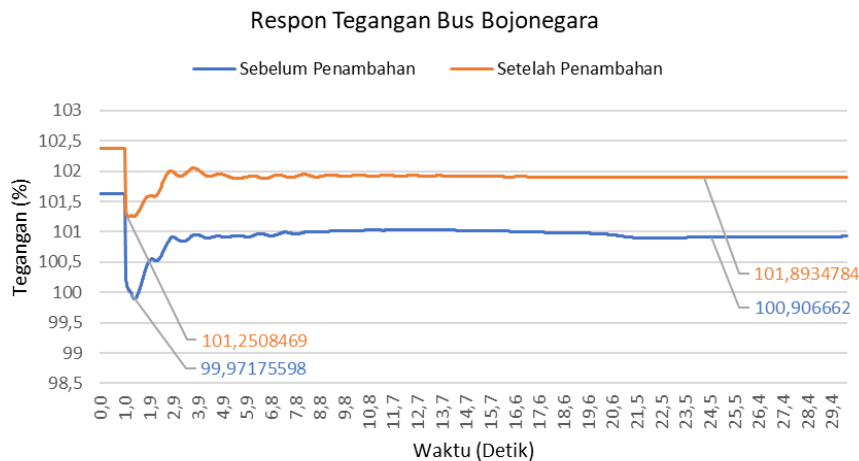
4.3.1 Analisis Hasil Studi Kasus 1 : Lepas Pembangkit



(a)



(b)



(c)

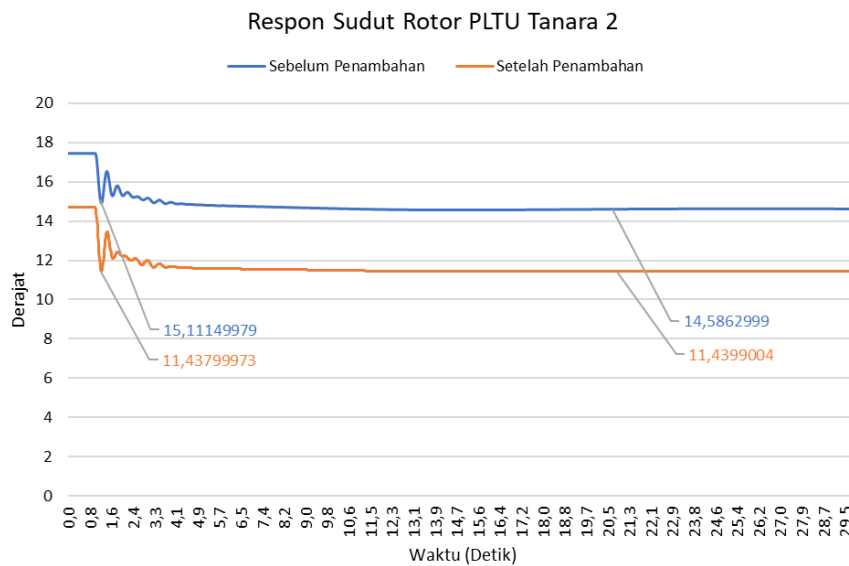
Gambar 4.31 Respon Sistem ketika Studi Kasus Lepas Pembangkit

(a) Respon Sudut Rotor PLTGU Priok, (b) Respon Frekuensi Bus Bojonegara, (c) Respon Tegangan Bus Bojonegara

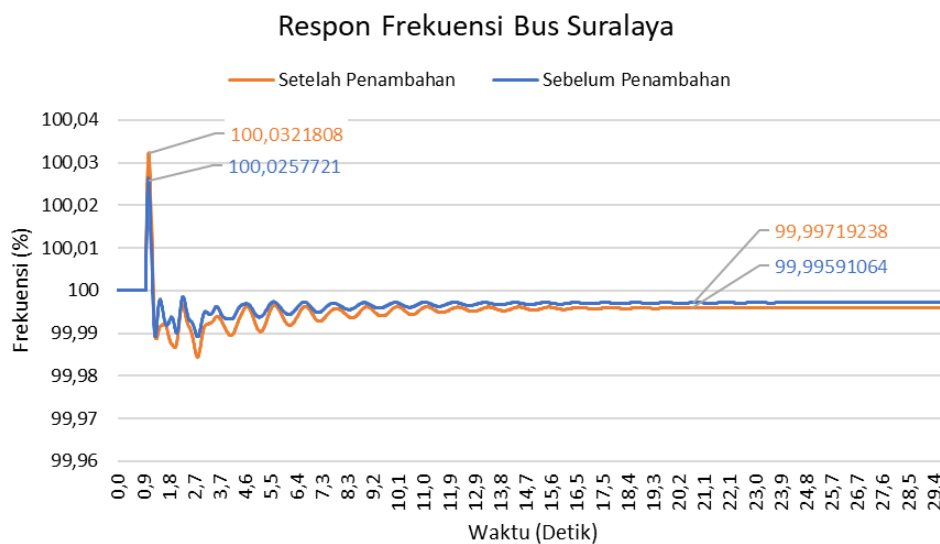
Pada analisis pertama mengenai gangguan pelepasan pembangkit membahas permasalahan yang timbul akibat lepasnya salah satu unit pembangkit dengan daya pembangkitan terbesar dari sistem. Pada studi kasus pertama ini, dilakukan pelepasan PLTU Bojonegara Unit 1 pada detik ke-1. Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika PLTU Bojonegara Unit 1 lepas dari sistem, sistem mengalami ketidakstabilan akibat berkurangnya pasokan listrik sementara total beban tetap. Terlihat pada gambar 4.31(a), respon sudut rotor yang dihasilkan setelah gangguan meningkat dari nilai awal. Hal ini terjadi karena setiap generator memikul beban yang lebih besar setelah gangguan, sehingga menyebabkan sudut rotor meningkat. Peningkatan beban yang ditanggung oleh setiap generator juga menyebabkan penurunan frekuensi sistem. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.31(b), di mana frekuensi pada bus gangguan (Bus Bojonegara) menurun lalu beresilasi hingga mencapai nilai kestabilan baru.

Dari gambar 4.31, dapat disimpulkan bahwa penambahan PLTU Suralaya 9&10 memberikan dampak positif terhadap stabilitas sistem, khususnya dalam meredam osilasi dan kecepatan meredam osilasi yang terjadi saat gangguan pelepasan pembangkit. Penambahan kapasitas pembangkitan juga mengurangi beban pada generator yang tersisa setelah salah satu generator terbesar terlepas, sehingga respon keseluruhan sistem menjadi lebih stabil. Selain itu, penambahan pembangkit baru meningkatkan total inersia sistem, yang berarti sistem menjadi lebih stabil dikarenakan inersia bertindak sebagai peredam (damping) terhadap perubahan mendadak dalam keseimbangan daya.

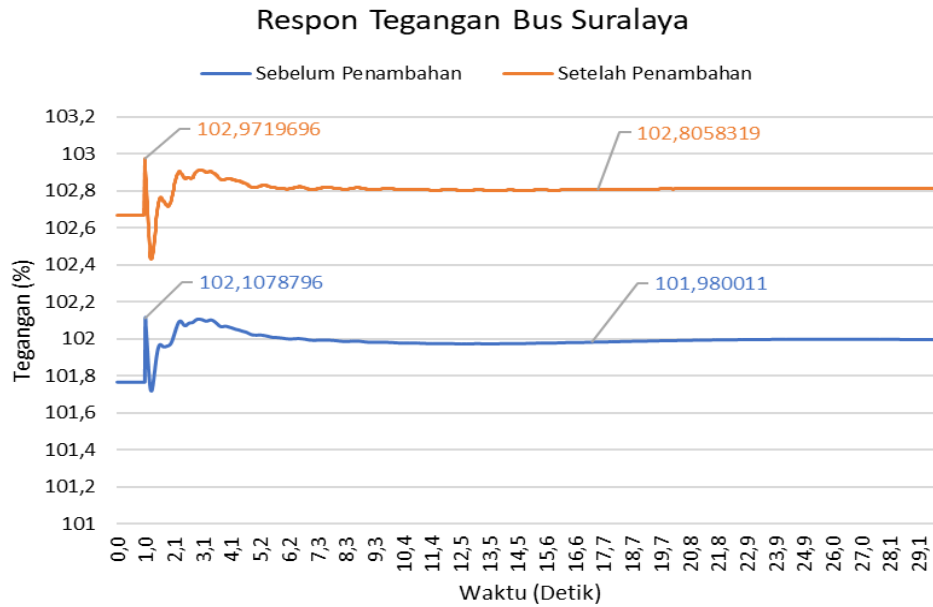
4.3.2 Analisis Hasil Studi Kasus 2 : Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda



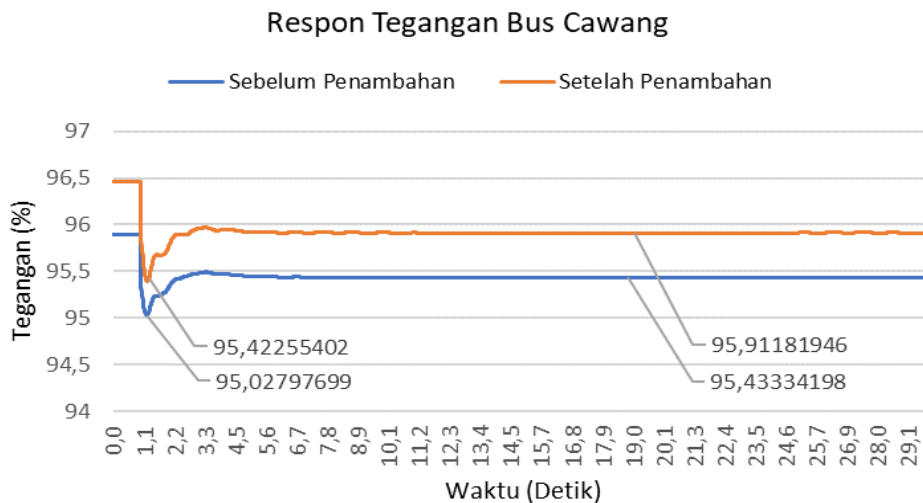
(a)



(b)



(c)



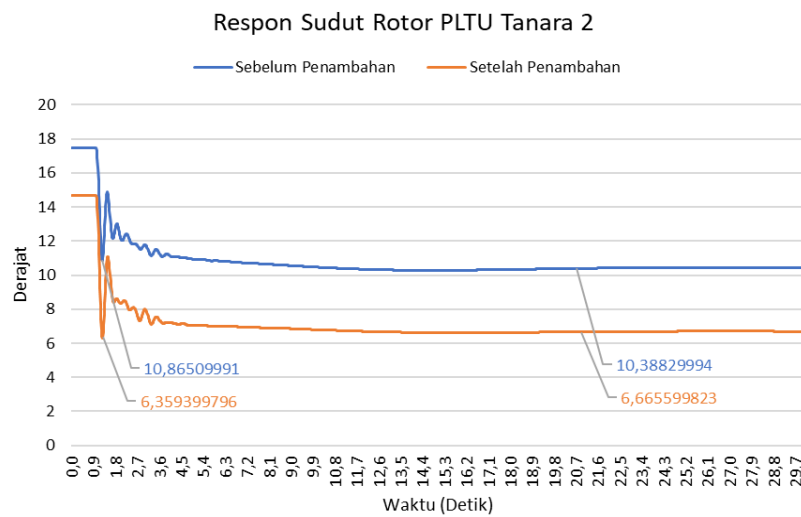
(d)

Gambar 4.32 Respon Sistem ketika Studi Kasus Lepas Satu Saluran dari Saluran Ganda (a) Respon Sudut Rotor PLTU Tanara 2, (b) Respon Frekuensi Bus Suralaya, (c) Respon Tegangan Bus Suralaya, (d) Respon Tegangan Bus Cawang

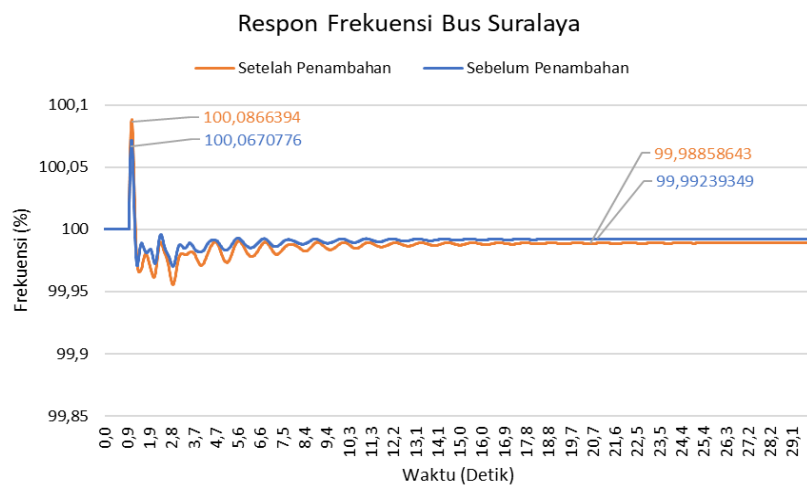
Ketika satu saluran dari saluran ganda Suralaya – Balaraja dilepas, distribusi aliran daya dalam sistem berubah secara signifikan. Hal ini mengakibatkan perubahan beban yang harus ditanggung oleh setiap generator. Semua generator mengalami perubahan sudut rotor sebagai upaya untuk menyeimbangkan kembali aliran daya dalam sistem. Secara keseluruhan, meskipun terjadi gangguan, sistem dapat menyesuaikan diri dan mempertahankan stabilitas, sebagaimana dibuktikan oleh stabilisasi sudut rotor pada semua generator setelah osilasi. Lepasnya saluran mengakibatkan distribusi daya di sistem berubah yang bisa menyebabkan ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan daya. Daya yang menuju bus Balaraja dari

Bus Suralaya masih bisa dipasok oleh satu saluran lainnya. Hal ini menyebabkan peningkatan frekuensi sementara dikarenakan Bus Suralaya merasakan pengurangan memikul beban dikarenakan lepasnya saluran transmisi. Namun, karena sistem tenaga listrik memiliki mekanisme kontrol seperti governor pada generator, frekuensi dengan cepat kembali stabil setelah osilasi kecil. Maka dapat disimpulkan bahwa frekuensi sistem masih dalam batas aman dan stabil. Begitu juga dengan respon tegangan pada Bus Suralaya yang mengalami kenaikan setelah terjadi gangguan baik sebelum maupun sesudah penambahan PLTU Suralaya 9&10 masing – masing stabil pada nilai 101,98% dan 102,80%. Namun, pada Bus Cawang mengalami penurunan tegangan dikarenakan aliran daya yang mengalir dari Bus Suralaya ke Bus Balaraja putus. Penurunan tegangan pada Bus Cawang baik sebelum maupun sesudah penambahan PLTU Suralaya 9&10 masih dapat mempertahankan kestabilannya dan dapat stabil di range $\pm 5\%$.

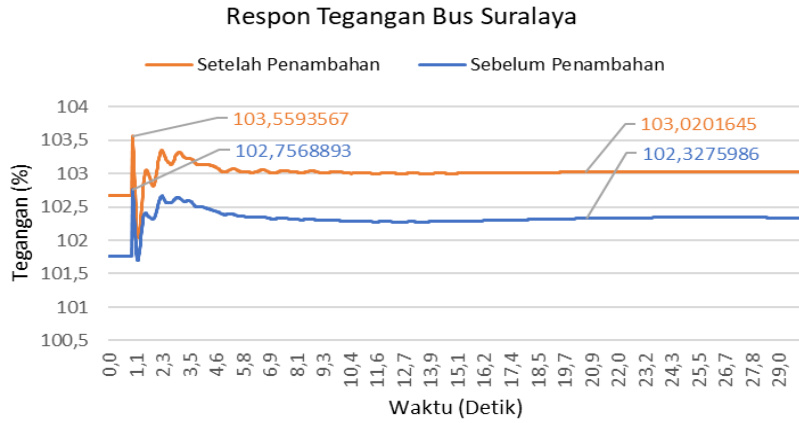
4.3.3 Analisis Hasil Studi Kasus 3 : Lepas Saluran Ganda



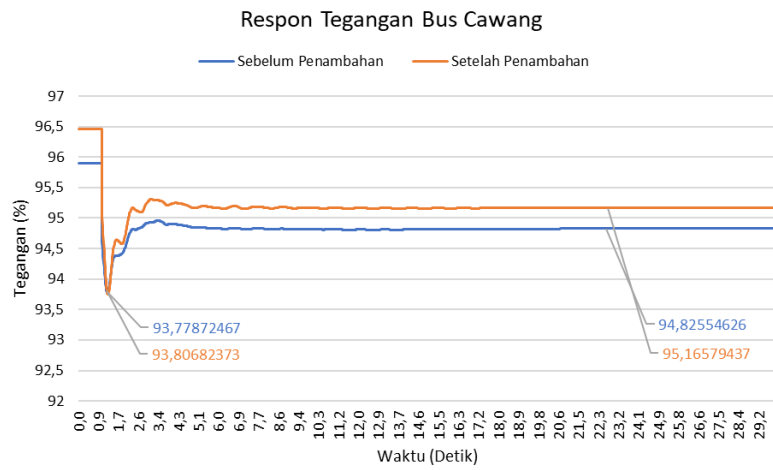
(a)



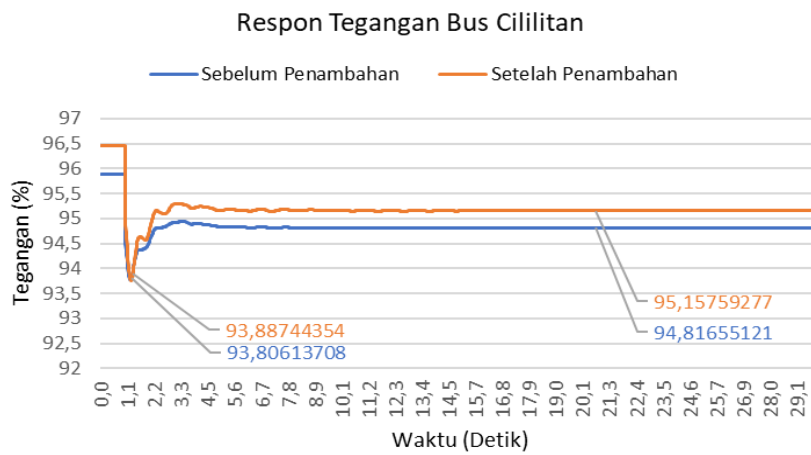
(b)



(c)



(d)



(e)

Gambar 4.33 Respon Sistem Ketika Studi Kasus Lepas Saluran Ganda
 (a) Respon Sudut Rotor PLTU Tanara 2, (b) Respon Frekuensi Bus Suralaya, (c) Respon Tegangan Bus Suralaya, (d) Respon Tegangan Bus Cawang, (e) Respon Tegangan Bus Cililitan

Ketika saluran ganda Suralaya – Balaraja dilepas, distribusi aliran daya dalam sistem berubah secara signifikan. Hal ini mengakibatkan perubahan beban yang harus ditanggung oleh setiap generator. Semua generator mengalami perubahan sudut rotor sebagai upaya untuk menyeimbangkan kembali aliran daya dalam sistem. Secara keseluruhan, meskipun terjadi gangguan, sistem dapat menyesuaikan diri dan mempertahankan stabilitas, sebagaimana dibuktikan oleh stabilisasi sudut rotor pada semua generator setelah osilasi. Lepasnya saluran mengakibatkan distribusi daya di sistem berubah yang bisa menyebabkan ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan daya. Perubahan sudut rotor akibat lepas saluran ganda lebih signifikan dibanding lepas satu saluran dari saluran ganda (studi kasus 2). Hal ini disebabkan putusnya aliran daya yang menuju ke bus Balaraja dari Bus Suralaya. Selain itu, terjadi juga peningkatan frekuensi sementara dikarenakan Bus Suralaya merasakan pengurangan memikul beban dikarenakan lepasnya saluran transmisi. Namun, karena sistem tenaga listrik memiliki mekanisme kontrol seperti governor pada generato, frekuensi dengan cepat kembali stabil setelah osilasi kecil. Maka dapat disimpulkan bahwa frekuensi sistem masih dalam batas aman dan stabil. Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa penambahan kapasitas pembangkit baru PLTU Suralaya 9&10 berdampak pada tegangan sistem, dengan peningkatan tegangan awal dan juga tegangan saat *steady state* setelah gangguan pada Bus Cawang dan Cililitan. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kapasitas daya reaktif dan redistribusi daya dalam sistem yang lebih efisien. Dapat dikatakan bahwa jalur – jalur dari Suralaya memainkan peran penting dalam mendistribusikan daya ke bus-bus ini, dan oleh karena itu, penambahan generator di Suralaya berdampak langsung pada tegangan di lokasi – lokasi tersebut. Dari gambar 4.33 (c), (d), dan (e), respon tegangan bus pada studi kasus lepas saluran ganda menunjukkan osilasi yang lebih baik setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10, dengan penurunan tegangan dan stabil di range $\pm 5\%$.

Setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10, saat terjadi gangguan lepas saluran ganda Suralaya – Balaraja terjadi *overload* pada saluran Bojonegara – Balaraja. Hal ini disebabkan karena saluran transmisi yang berada di sebelah saluran yang lepas menanggung beban yang lebih besar. Jika beban yang ditanggung melebihi batas kemampuan hantar arus (*ampacity* saluran) akibatnya saluran tersebut akan *overload*. Pada kasus lepas saluran ganda Suralaya – Balaraja, menyebabkan Line 46 (Bojonegara – Balaraja) mengalami *overload*. Hal ini dikarenakan daya output yang dihasilkan oleh pembangkit yang berada di Provinsi Banten seperti PLTU Suralaya, PLTU Banten, PLTU Suralaya Baru, dan PLTU Bojonegara hanya dialirkan oleh 2 saluran yaitu saluran Suralaya – Balaraja dan saluran Bojonegara – Balaraja ke pusat – pusat beban seperti Bus Balaraja, Bus Lengkong, Bus Cikupa, dan Bus lainnya. Apabila salah satu dari kedua saluran tersebut lepas (saluran Suralaya – Balaraja), hal ini dapat menyebabkan *overload* pada saluran Bojonegara – Balaraja dikarenakan hanya saluran tersebut yang dapat mentransfer daya dari pusat pembangkit di Provinsi Banten ke pusat beban di Provinsi Jakarta dan sekitarnya. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penambahan kapasitas hantar saluran agar saat saluran Suralaya – Balaraja lepas, masih ada saluran lain yang dapat mentransfer daya dari pusat pembangkit di Banten ke pusat beban di Jakarta dan sekitarnya.

Tabel 4.5 *Overload* Saluran Bojonegara – Balaraja

No	Kasus	Limit <i>Operating</i> (A)	<i>Operating</i> (A)	<i>Operating</i> (%)	Status
1	Overload Line Bojonegara - Balaraja	4525,2	6145,8	135,8	Tidak Aman

Untuk mengatasi *overload* tersebut, perlu dilakukan penambahan kapasitas hantar saluran untuk mengurangi pembebanan yang ditanggung oleh saluran Bojonegara – Balaraja saat ini. Penambahan kapasitas hantar saluran dilakukan dengan membangun saluran baru antara Bus Banten ke Bus Balaraja. Maka arus yang diharapkan untuk mengalir ke saluran baru Banten – Balaraja adalah:

$$I = I_{\text{operating}} - I_{\text{ampacity}}$$

$$I = 6145,8 - 4525,8$$

$$I = 1620,6 \text{ A.}$$

Untuk menyalurkan energi listrik pada saluran transmisi ini, digunakan *bundle conductor* dengan tujuan untuk meningkatkan kapasitas daya saluran transmisi. Berdasarkan RUPTL PT PLN (Persero) 2021 – 2030, kebutuhan energi listrik tumbuh rata-rata 4,29%, sehingga dipilih sirkuit vertikal ganda untuk perencanaan saluran transmisi ini. Hal ini dimaksudkan untuk keperluan jangka panjang karena kebutuhan energi listrik yang terus meningkat. Selain itu, penggunaan beberapa konduktor per fasa dapat mengurangi resistansi total saluran karena setiap konduktor menanggung sebagian dari total arus. Ini membantu mengurangi kerugian daya secara keseluruhan. Pada perencanaan saluran transmisi kali ini, digunakan *bundle conductor* (np) sebanyak 4 buah sub konduktor, sehingga arus yang mengalir pada setiap sub konduktor (I_k) adalah:

$$I_k = I/np$$

$$I_k = 1620,6/4$$

$$I_k = 405,15 \text{ A}$$

Menurut perhitungan di atas, dapat digunakan konduktor ACSR (*Aluminium Conductor Steel Reinforced*) 26/7 dengan luas penampang 135,2 mm², diameter 1,63 cm, atau jari – jari 0,815 cm yang memiliki *ampacity* sebesar 475 A.

Menurut Peraturan Menteri Perindustrian Republik Indonesia Nomor 15/M-IND/PER/3/2016 tentang “Standar Spesifikasi dan Standar Harga Tower Transmisi dan Konduktor Produk Dalam Negeri Dalam Rangka Percepatan Pembangunan Infrastruktur Ketenagalistrikan,” Pasal 3 menyatakan bahwa spesifikasi konduktor paling rendah menggunakan ACSR 240/40 (*Aluminium Conductor Steel Reinforced* dengan luas penampang 240 milimeter persegi) yang mengacu pada SPLN 41-7:1981. Oleh karena itu, dalam perencanaan ini digunakan konduktor ACSR 26/7 dengan luas penampang 282 mm², diameter 2,354 cm, atau jari-jari 1,177 cm, yang memiliki kuat hantar arus sebesar 726 A. Penggunaan konduktor jenis ACSR dipilih karena bagian inti konduktor ini berupa kawat baja yang mempunyai kekuatan mekanik tinggi, sedangkan bagian permukaannya mempunyai konduktivitas tinggi.

Dari hasil analisis dan perhitungan tersebut, digunakan tipe konduktor DOVE dengan spesifikasi sebagai berikut.

Tabel 4.6 Data Konduktor Saluran Baru Banten – Balaraja yang Digunakan

Code Word		DOVE
Size	AWG or kcmil	556,5
Stranding	Al/Stl	26/7
Diameter		
Aluminium	Inch	0,1463
Steel	Inch	0,1138
Complate Cable	Inch	0,927
Weight		
Alumunium	Lbs/1000 ft	524
Steel	Lbs/1000 ft	241
Total	Lbs/1000 ft	765
Content		
Alumunium	%	68,51
Steel	%	31,49
Rated Strength	lbs	22600
Resistance OHMS		
DC @ 20°C	Ohms/1000 ft	0,0306
AC @ 75°C	Ohms/1000 ft	0,0375
Allowable Ampacity	Ampere	726

Setelah dilakukan penambahan saluran baru Banten – Balaraja, berikut hasil aliran daya dan pembebanan di beberapa saluran:

Tabel 4.7 Pembebanan Saluran Transmisi Setelah Penambahan Saluran Banten - Balaraja Saat Kasus Lepas Saluran Ganda Saluraja – Balaraja

No	Kasus	Limit Operating (A)	Operating (A)	Operating (%)	Status
1	Bojonegara – Balaraja	4525,2	3332,4	73,6%	Aman
2	Banten – Balaraja	4524,2	3503,7	77,4%	Aman
3	Banten – Bojonegara	4524,2	1189,5	26,3%	Aman

Setelah dilakukan penambahan saluran baru Banten – Balaraja, tidak ada terjadi *overload* pada saluran transmisi saat terjadi lepas saluran ganda Suralaya – Balaraja.

4.3.4 Analisis Hasil Studi Kasus 4 : Hubung Singkat 3 Fasa

Berdasarkan hasil simulasi gangguan hubung singkat 3 fasa, diperoleh nilai *Critical Clearing Time* (CCT) untuk gangguan hubung singkat 3 fasa sebelum dan sesudah penambahan PLTU Suralaya 9&10. Nilai *critical clearing time* dari kedua skenario tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.8 Nilai CCT Sebelum dan Sesudah Penambahan PLTU Suralaya Unit 9&10

	Studi Kasus Hubung Singkat 3 Fasa	
	Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10	Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10
Nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT)	176 Milidetk	187 Milidetk

Dari tabel 4.8, penambahan dua unit generator baru yaitu PLTU Suralaya unit 9&10 dengan kapasitas 2000 MW telah meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik Jawa Madura Bali. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai CCT dari 176 milidetik menjadi 187 milidetik. Peningkatan CCT ini berarti sistem kini lebih mampu menangani gangguan hubung singkat 3 fasa dengan waktu *clearing* yang lebih lama sebelum mencapai kondisi tidak stabil. Secara keseluruhan, penambahan generator baru memberikan manfaat signifikan dalam meningkatkan keandalan dan stabilitas sistem tenaga listrik di wilayah Jawa Madura Bali. Penambahan dua unit generator di PLTU Suralaya 9&10 meningkatkan inersia total sistem. Inersia sistem adalah kemampuan sistem untuk melawan perubahan kecepatan rotor akibat gangguan. Semakin besar inersia, semakin lambat perubahan sudut rotor, yang berarti sistem lebih stabil.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

4.4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis hasil simulasi stabilitas transien dengan melihat respon sudut rotor, respon frekuensi, dan respon tegangan di sistem kelistrikan Jawa Madura Bali 500 kV tahun 2026, dapat disimpulkan bahwa:

1. Pada studi kasus lepas pembangkit, penambahan PLTU Suralaya 9 dan 10 menghasilkan penurunan nadir frekuensi yang lebih kecil. Penambahan PLTU Suralaya 9&10 juga memberikan dampak positif yaitu mengurangi osilasi dan mempercepat peredaman osilasi sudut rotor serta frekuensi menuju keadaan stabil.
2. Studi kasus lepas satu saluran dari saluran ganda Suralaya – Balaraja tidak terlalu berpengaruh signifikan ke sistem dikarenakan masih ada satu saluran yang dapat mentransmisikan daya. Perubahan respon sudut rotor, respon frekuensi, dan respon tegangan masih dalam keadaan stabil.
3. Respon tegangan bus pada studi kasus lepas saluran ganda mengalami osilasi dan menjadi lebih bagus ketika PLTU Suralaya 9&10 ditambahkan. Penurunan tegangan setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10 lebih baik karena masih dapat stabil di range $\pm 5\%$.
4. Setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10, lepas saluran ganda Suralaya – Balaraja menyebabkan terjadinya *overload* pada saluran Bojonegara – Balaraja sebesar 135,8%. Maka dilakukan penambahan saluran baru dari Banten – Balaraja untuk mengatasi *overload* tersebut.
5. Dalam studi kasus gangguan hubung singkat tiga fasa pada saluran Gandul – Depok, diperoleh nilai *Critical Clearing Time* (CCT) yang lebih baik saat setelah penambahan PLTU Suralaya 9&10. Nilai CCT yang diperoleh saat sebelum dan sesudah penambahan PLTU Suralaya 9&10 berturut – turut yaitu 176 milidetik dan 187 milidetik. Dengan standar waktu pemutusan gangguan di sistem 500 kV yang ditetapkan sebesar 90 milidetik, maka dapat dinyatakan bahwa sistem tetap stabil saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa.

4.5 Saran

Dari hasil pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk perbaikan yaitu sebagai berikut:

1. Untuk memperoleh hasil yang lebih baik dan akurat, diperlukan data asli dan terbaru yang lebih lengkap, seperti data pemodelan beban secara riil.
2. Karena pada tugas akhir ini menggunakan 4 studi kasus, maka untuk memperoleh hasil yang lebih baik dapat menambahkan studi kasus lainnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT. PLN (Persero), "Statistik PLN 2022," Sekretariat Perusahaan PT. PLN (Persero), Jakarta, 2023.
- [2] PT PLN (Persero), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030," 2021.
- [3] H. Saadat, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [4] R. S. Anwar, "Analisis Stabilitas Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban Akibat Penambahan Pembangkit 1x26,8 MW pada Sistem Kelistrikan PT. Petrokimia Gresik," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [5] P. P. Rezky, "Studi Analisa Stabilitas Transien Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV Setelah Masuknya Pembangkit Paiton 1000 MW pada Tahun 2021," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [6] P. Widodo, M. N. Chanif, Y. Rahmawati, I. Fadlika, A. Afandi and A. E. Apriyanto, "Transient Stability Analysis to Determine CCT Due to Increased Load and Addition of Transmission Lines in Malang Raya Interconnection System," in *2019 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI)*, Bandung, 2019.
- [7] E. Tridianto, O. Penangsang and A. Soeprijanto, "Analisis Stabilitas Transien pada PT. Petrokimia Gresik Akibat Penambahan Pembangkit 20 & 30 MW serta Penambahan Pabrik Fosforit Acid dan Amunium Urea," Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [8] V. Vittal, J. D. McCalley, P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 3rd Edition, Wiley-IEEE Press, 2019.
- [9] N. Hatziargyriou, J. Milanovic, C. Rahmann, V. Ajjarapu, C. Canizares, I. Erlich, D. Hill, I. Hiskens, I. Kamwa, B. Pal, P. Pourbeik, J. Sanchez-Gasca, A. Stankovic, T. V. Cutsem, V. Vittal and C. Vournas, "Definition and Classification of Power System Stability - Revisited & Extended," vol. 36, no. 4, 2021.
- [10] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, New York: McGraw Hill, 1994.
- [11] B. A. Ar-Zhandy, "Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di PT. Pusri Akibat penambahan Generator dan Penambahan Beban," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [12] M. A. Efendy, "Analisis Kestabilan Transien Multi-Machine Berbasis Single-Machine To Infinite Bus (SMIB) Pada Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV dengan Metode Power Flow Tracing (PFT)," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.

[13] H. Li, C. Wang, X. Zhang, Z. Zheng, K. Wu, R. Liang and L. Feng, "A Critical Clearing Time Calculation Method Based on Enhanced Binary Search," in *2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE)*, 2021.

[14] ANSI/IEEE Std 399-1997, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis," 1997.

[15] ANSI/IEEE Std C37.106-2003, "IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987)," The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2004.

[16] ANSI/IEEE Std 1159-1995(R2001), "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality".

Lampiran 2. Hasil Simulasi Aliran Daya Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Study ID	Untitled
Study Case ID	Sebelum Penambahan PLTU Suralaya 9&10
Buses	158
Branches	165
Generators	85
Loads	44
Load MW	34.255
Load MVAR	16.590,45
Generation MW	34.638,17
Generation MVAR	15.782,59

Hasil Simulasi Analisa Aliran Daya Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10

Study ID	Untitled
Study Case ID	Setelah Penambahan PLTU Suralaya 9&10
Buses	162
Branches	170
Generators	87
Loads	44
Load MW	34.255
Load MVAR	16.590,45
Generation MW	34.642,4
Generation MVAR	15.478,08

Lampiran 3. Profil Tegangan Hasil Simulasi *Loadflow* Sistem Jawa Madura Bali 500 kV Tahun 2026

Bus ID	Tegangan Nominal (kV)	Tegangan Hasil Simulasi (%)	Deviasi (%)
Adipala	500	102,981	2,98
Antosari	500	96,765	-3,23
Balaraja	500	98,675	-1,32
Bandung Selatan	500	100,126	0,13
Bangil	500	100,484	0,48
Banten	500	102,658	2,66
Bekasi	500	97,468	-2,53
Bogor	500	97,725	-2,27
Bojonegara	500	102,383	2,38
Cawang	500	96,459	-3,54
Cibatu	500	99,360	-0,64
Cibatu 2	500	99,358	-0,64
Cibinong	500	97,357	-2,64
Cigereleng	500	99,868	-0,13
Cikupa	500	98,221	-1,78
Cilacap	500	103,109	3,11
Cilamaya	500	101,288	1,29
Cilegon	500	102,511	2,51
Cililitan	500	96,455	-3,55
Cirata	500	100,301	0,30
Cirebon	500	102,132	2,13
Cisokan	500	100,153	0,15
Deltamas	500	99,442	-0,56
Depok	500	96,960	-3,04
Duri Kosambi	500	97,190	-2,81
Gandul	500	96,760	-3,24
Grati	500	100,407	0,41
Gresik	500	100,592	0,59
Indramayu	500	102,707	2,71
Jateng	500	104,150	4,15
Kediri	500	99,439	-0,56
Kembangan	500	97,207	-2,79
Kesugihan	500	102,452	2,45
Krian	500	99,766	-0,23
Lengkong	500	97,116	-2,88
M.Karang	500	97,498	-2,50
M.Tawar	500	98,290	-1,71
Mandirancan	500	101,976	1,98

Bus ID	Tegangan Nominal (kV)	Tegangan Hasil Simulasi (%)	Deviasi (%)
Ngimbang	500	98,251	-1,75
Paiton	500	102,749	2,75
Pedan	500	101,282	1,28
Pemalang	500	103,842	3,84
Priok	500	97,798	-2,20
Saguling	500	100,396	0,40
Surabaya Selatan	500	99,114	-0,89
Segara Rupek	500	99,927	-0,07
Suralaya 9&10	500	102,680	2,68
Suralaya Baru	500	102,667	2,67
Suralaya	500	102,666	2,67
T.Jati	500	104,195	4,20
T.Jatia-SS	500	103,979	3,98
Tambun	500	97,274	-2,73
Tanara	500	99,880	-0,12
Tandes	500	100,458	0,46
Tasik	500	100,665	0,67
Tuntang	500	101,665	1,66
Ujung Berung	500	99,783	-0,22
Ungaran	500	102,263	2,26
Watudodol	500	100,038	0,04
Rata – rata			1,87

Lampiran 4. Aliran Daya pada Saluran Transmisi 500 kV Jawa Madura Bali Tahun 2026

Dari Bus	Ke Bus	MW Flow	MVAR Flow
Adipala	Kesugihan	2064,724	622,706
Balaraja	Lengkong	2587,888	805,281
Balaraja	Cikupa	2208,765	798,189
Balaraja	Kembangan	1125,660	317,852
Bandung Selatan	Cigereleng	1022,669	287,817
Bandung Selatan	U.Berung	87,411	66,548
Bangil	Kediri	393,282	105,240
Banten	Bojanegara	1048,937	345,314
Bekasi	Cawang	721,629	435,594
Bekasi	Tambun	597,777	271,857
Bogor	Depok	774,030	462,564
Bogor	Cibinong	253,911	104,049
Bojanegara	Balaraja	2843,592	946,714
Cawang	Cililitan	1,838	145,974
Cibatu	Cibatu 2	277,307	-27,346
Cibatu 2	M.Tawar	1167,972	468,434
Cibinong	Depok	444,962	423,125
Cibinong	Tambun	166,667	28,539
Cigereleng	Bogor	410,575	302,118
Cikupa	Kembangan	1180,639	296,680
Cilacap	Adipala	1481,455	429,577
Cilamaya	Cibatu 2	1465,712	710,758
Cilegon	Bogor	1003,575	267,569
Cirata	Deltamas	419,271	307,140
Cirata	Saguling	184,074	-127,715
Cirebon	Mandirancan	897,846	237,044
Cisokan	Cibinong	1189,451	634,858
Deltamas	Cibatu	1672,142	646,604
Depok	Gandul	452,008	592,210
Gandul	Cililitan	754,869	181,615
Grati	Surabaya Selatan	862,757	312,700
Grati	Krian	168,609	50,385
Gresik	Krian	996,767	546,645
Gresik	Tandes	457,436	197,633
Indramayu	Deltamas	1985,119	556,478
Jateng	Pemalang	1796,092	164,763
Kembangan	Duri Kosambi	861,498	36,086
Kembangan	Gandul	704,450	185,860
Kesugihan	Tasik	626,831	147,473

Dari Bus	Ke Bus	MW Flow	MVAR Flow
Kesugihan	Pedan	161,528	-137,027
Krian	Ngimbang	170,524	219,430
Lengkong	Gandul	1501,654	238,088
M.Karang	Duri Kosambi	79,402	381,193
M.Tawar	Bekasi	1927,930	1003,028
M.Tawar	Priok	808,508	569,002
M.Tawar	Cawang	483,529	262,095
Mandirancan	Bandung Selatan	811,708	122,665
Mandirancan	U.Berung	527,971	138,871
Paiton	Watudodol	1220,882	208,807
Paiton	Grati	1156,890	341,622
Paiton	Bangil	1126,845	292,063
Pedan	Kediri	847,755	-118,169
Pemalang	Ungaran	1492,540	252,042
Pemalang	Mandirancan	1075,137	-25,034
Priok	M.Karang	456,721	543,696
Saguling	Bandung Selatan	589,677	34,839
Saguling	Cisokan	232,467	202,697
Segara Rupek	Antosari	1212,394	437,188
Suralaya	Balaraja	2921,049	984,802
Suralaya	Cilegon	564,050	182,516
Suralaya	Suralaya Baru	10,955	-12,788
Suralaya 9&10	Cilegon	1121,225	373,024
Suralaya 9&10	Suralaya	674,354	162,690
Suralaya Baru	Banten	435,395	143,208
T.Jati	Ungaran	2369,148	55,368
T.Jati	Pemalang	1202,794	-232,399
T.Jatia-SS	Indramayu	1091,577	109,110
T.Jatia-SS	Pemalang	115,455	-158,055
Tanara	Balaraja	1794,328	1001,336
Tasik	Cigereleng	1,609	86,876
Tuntang	Pedan	1645,561	-62,622
Ungaran	Tuntang	2407,076	310,894
Ungaran	Ngimbang	688,698	52,083
Ungaran	Krian	515,226	-64,138
Watudodol	Segara Rupek	1212,699	430,805

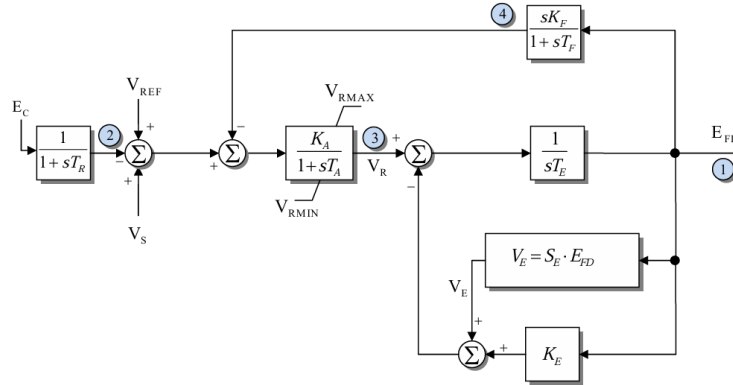
Lampiran 5. Nilai Hubung Singkat 3 Fasa di Bus 500 kV Jawa Madura Bali

Bus ID	Rated Voltage (kV)	Arus Hubung Singkat 3 Fasa (kA)
Adipala	500	37,697
Antosari	500	20,107
Balaraja	500	128,016
Bandung Selatan	500	78,632
Bangil	500	36,518
Banten	500	90,493
Bekasi	500	132,831
Bogor	500	97,333
Bojanegara	500	80,365
Cawang	500	117,489
Cibatu	500	103,164
Cibatu 2	500	103,688
Cibinong	500	128,452
Cigereleng	500	74,519
Cikupa	500	105,282
Cilacap	500	36,075
Cilamaya	500	42,312
Cilegon	500	82,916
Cililitan	500	117,683
Cirata	500	81,504
Cirebon	500	37,983
Cisokan	500	71,532
Deltamas	500	101,531
Depok	500	146,247
Duri Kosambi	500	124,780
Gandul	500	160,092
Grati	500	54,635
Gresik	500	46,260
Indramayu	500	37,017
Jateng	500	44,254
Kediri	500	33,958
Kembangan	500	129,368
Kesugihan	500	42,358
Krian	500	56,369
Lengkong	500	114,446
M.Karang	500	113,840
M.Tawar	500	153,965
Mandirancan	500	43,078

Bus ID	Rated Voltage (kV)	Arus Hubung Singkat 3 Fasa (kA)
Ngimbang	500	27,735
Paiton	500	62,363
Pedan	500	45,931
Pemalang	500	57,835
Priok	500	122,042
Saguling	500	86,383
Surabaya Selatan	500	31,402
Segara Rupek	500	21,867
Suralaya 9&10	500	90,462
Suralaya Baru	500	91,556
Suralaya	500	92,845
T.Jati	500	47,385
T.Jatia-SS	500	32,625
Tambun	500	115,314
Tanara	500	68,643
Tandes	500	40,071
Tasik	500	39,026
Tuntang	500	51,832
U.Berung	500	35,672
Ungaran	500	57,197
Watudodol	500	22,108

Lampiran 6. Data Exciter dan Governor

1. Data Exciter Type 1

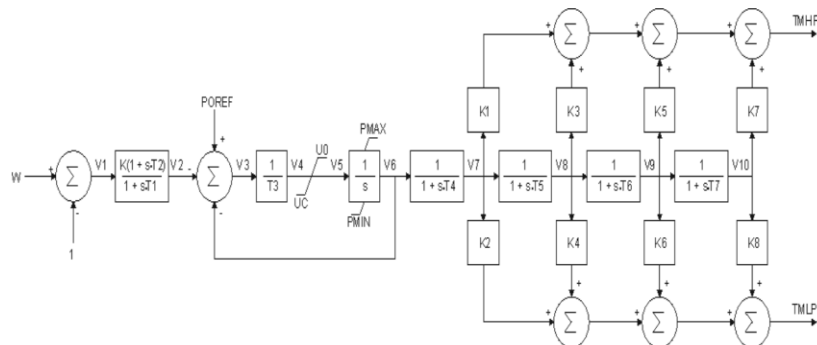


VRmax	VRmin	SEmax	SE.75	Efdmax
17,5	-15,5	1,65	1,13	6,6

KA	KE	KF
250	1	0,06

TA	TE	TF	TR
0,03	1,25	1	0,005

2. Data Governor Type STM

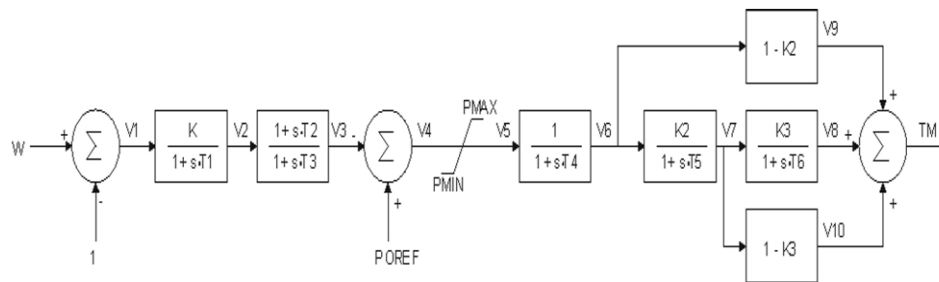


Droop	UO	UC	DB
5	5	-5	0

K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8
0,11	0,11	0,11	0,11	0,15	0,15	0,13	0,13

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
0,1	0	0	0,19	11	0,3	0

3. Data Governor Type SGT



Pref
1

K1	K2	K3	TR
17	0	0	0

T1	T2	T3	T4	T5	T6
0,1	0	0,2	0,5	0	0

BIODATA PENULIS



Suprayetno. dilahirkan di Duri, 7 April 2001. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di SDN 23 Petani, SMPN 5 Mandau dan SMAN 2 Mandau. Setelah lulus dari SMAN tahun 2020, pada tahun yang sama penulis masuk ke Jurusan S1 Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan fokus bidang studi yaitu teknik sistem tenaga.

Selama menempuh studinya di Departemen Teknik Elektro, penulis aktif mengikuti kegiatan akademik dan non akademik yaitu mengikuti beberapa organisasi dan kepanitiaan. Dalam bidang pekerjaan, penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT PLN Indonesia Power Suralaya PGU yang tergabung bersama tim Pemeliharaan Listrik Unit 1 – 4. Selain itu, penulis juga pernah magang di Unit Pelaksana Penyaluran dan Pengaturan Beban (UP3B) Mataram dan bergabung bersama tim Unit Layanan Transmsi dan Gardu Induk (ULTG) Lombok Barat yang berperan sebagai tim pemeliharaan jaringan dan gardu induk baik pemeliharaan level 1, level 2, maupun level 3. Dari segala kesibukan dan pengalaman selama menempuh studi di ITS, tentunya menjadi pengalaman berharga bagi penulis kedepannya. Penulis dapat dihubungi melalui email suprayetno20duri@gmail.com.