



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN AKIBAT  
GANGGUAN (*GENERATOR TRIP*, HUBUNG  
SINGKAT DAN *LINE TRIP*) DENGAN MENENTUKAN  
*CRITICAL CLEARING TIME (CCT)* DAN *SINGLE  
POLE AUTO RECLOSING TIME*, SISTEM TRANSMISI  
JAMALI 500 KV PADA TAHUN 2019**

Anizar Rizky  
NRP 2215105004

Dosen Pembimbing  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Danar Fahmi, ST. MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**FINAL PROJECT - TE 141599**

**ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY DUE FAULT  
(GENERATOR TRIP, SHORT CIRCUIT AND LINE  
TRIP) BY DETERMINING CRITICAL CLEARING TIME  
(CCT) AND SINGLE POLE AUTO RECLOSING TIME  
AT 500 KV TRANSMISSION SYSTEM BY 2019**

Anizar Rizky  
NRP 2215105004

Advisor  
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Danar Fahmi, ST. MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Analisis Stabilitas Transien Akibat Gangguan (*Generator Trip, Hubung Singkat dan Line Trip*) dengan Menentukan *Critical Clearing Time (CCT)* dan *Single Pole Auto Reclosing Time, Sistem Transmisi Jamali 500 kV pada Tahun 2019*” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.**

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

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

Surabaya, Juli 2017

Anizar Rizky  
Nrp. 2215 105 004

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN AKIBAT GANGGUAN  
(GENERATOR TRIP, HUBUNG SINGKAT DAN LINE TRIP)  
DENGAN MENENTUKAN CRITICAL CLEARING TIME (CCT)  
DAN SINGLE POLE AUTO RECLOSEING TIME, SISTEM  
TRANSMISI JAMALI 500 KV PADA TAHUN 2019**

**TUGAS AKHIR**

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

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**



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

**Daniar Fahmi, ST. MT.**  
**NIP.198909252014041002**



**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN AKIBAT  
GANGGUAN (*GENERATOR TRIP, HUBUNG SINGKAT  
DAN LINE TRIP*) DENGAN MENENTUKAN *CRITICAL  
CLEARING TIME (CCT)* DAN *SINGLE POLE AUTO  
RECLOSING TIME*, SISTEM TRANSMISI JAMALI 500 KV  
PADA TAHUN 2019**

Nama : Anizar Rizky  
NRP : 2215105004  
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Dosen Pembimbing 2 : Daniar Fahmi, ST. MT.

**ABSTRAK**

Kestabilan adalah hal yang utama dalam sistem tenaga listrik. Ada banyak penyebab yang mempengaruhi kestabilan yaitu beban yang terus bertambah. Dalam sistem transmisi Jamali pada tahun 2019 dilakukan penambahan kapasitas pembangkit 13360 MW untuk memenuhi kebutuhan beban 19302 MW dan pengembangan transmisi dengan penambahan GITET Muara Karang, Cigelereng, Cibatu Baru, Pamulang, Tandes dan Krian, maka diperlukan pengujian analisis kestabilan transien. Pada tugas akhir ini dilakukan percobaan analisis kestabilan transien dengan memberikan gangguan hubung singkat, pelepasan generator dan pelepasan saluran. Metode yang digunakan untuk memperbaiki kestabilan transien ketika gangguan hubung singkat 3 fasa dengan menentukan *critical clearing time* dan untuk gangguan 1 fasa ke tanah digunakan metode menentukan *single pole auto reclosing time*. Hasil analisis kestabilan transien gangguan hubung singkat 3 fasa pada kondisi beban peak saluran Gandul-Lekong waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil dengan 0.543-0.544 detik dan frekuensi dalam *range* aman dengan 0.252-0.253 detik. Untuk gangguan 1 fasa ke tanah didapatkan pemutusan saluran 0.2 detik dan penutupan kembali 0.9 detik. Untuk gangguan pelepasan generator dan pelepasan saluran sistem masih dalam keadaan stabil.

**Kata Kunci** : kestabilan transien, *critical clearing time*, *single pole auto reclosing time*, pelepasan pembangkit, pelepasan saluran

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY DUE FAULT  
(GENERATOR TRIP, SHORT CIRCUIT AND LINE TRIP)  
BY DETERMINING CRITICAL CLEARING TIME (CCT)  
AND SINGLE POLE AUTO RECLOSING TIME AT 500 KV  
JAMALI TRANSMISSION SYSTEM BY 2019**

Name : Anizar Rizky  
NRP : 2215105004  
Advisor I : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.  
Advisor II : Daniar Fahmi, ST. MT.

**ABSTRACT**

*Stability is the main thing in electric power systems. There are many causes that affect the stability that is load continues to grow. In Jamali transmission system 2019, the increase of generating capacity 13360 MW to meet the load requirements 19302 MW and development of transmission with additional GITET Muara Karang, Cigelerang, Cibatu Baru, Pamulang, Tandes and Krian, requires transient stability analysis. In this study of transient stability analysis by giving fault short circuit, generator out and line trip. The method is performed used to improve transient stability when 3 phase phase short circuit determining critical clearing time and for 1 phase to ground short circuit is used determining single pole auto reclosing time. On the peak load condition, the result for 3 phase short at Gandul-Lekong line, it needs 0.543-0.544 seconds for critical clearing time and 0.252-0.253 seconds for frequency. The result for 1 phase to ground short circuit, it need 0.2 seconds for line disconnection and 0.9 seconds for reclose line. For fault generator out and line trip, system is still in a stable state.*

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

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

*Alhamdulillah Robbil 'Alamin*, segala puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul **“Analisis Stabilitas Transien Akibat Gangguan (*Generator Trip, Hubung Singkat dan Line Trip*) dengan Menentukan *Critical Clearing Time (CCT)* dan *Single Pole Auto Reclosing Time*, Sistem Transmisi Jamali 500 kV pada Tahun 2019”**

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT karena tanpaNya penulis tidak akan bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua saya yang selalu medoakan, memberikan semangat dan memberikan motivasi agar saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang selaku dosen pembimbing pertama yang telah bersedia memberikan saya plan untuk Tugas Akhir dan selalu memberikan bimbingan dalam mengerjakan Tugas Akhir dan membimbing untuk menyelesaikan masalah, sehingga saya dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Daniar Fahmi, ST. MT. selaku dosen pembimbing kedua yang telah selalu memberikan masukan dalam mengerjakan Tugas Akhir dan bimbingan untuk dapat menyelesaikan masalah dan telah memberi masukan dalam buku agar Tugas Akhir ini dapat selesai tepat pada waktunya.
5. Teman-teman sistem tenaga lintas jalur 2015 khususnya yang mengambil di Lab PSSL yaitu fajar, ady, redho, ozy, tiar, vita, asyraf, apri, dito, gilang, imam, wisnu, boni, candra, vita, norma dan okky yang selalu memberikan info dalam pengerjaan Tugas Akhir dan info untuk bimbingan serta memberikan motivasi dan semangat saat pengerjaan Tugas Akhir.
6. Semua pihak yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk membantu penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Serta kepada semua pihak yang telah mebanu dalam masa perkuliahan dan pengerjaan Tugas Akhir. Besar harapan penulis dalam buku Tugas Akhir ini bisa memberikan masukan dan manfaat bagi pembaca. Penulis juga berharap mendapatkan kritik dan saran yang dapat membangun agar lebih baik lagi. Terima kasih

Surabaya, Juli 2017

Penulis

# DAFTAR ISI

	HALAMAN
<b>JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan dan Batasan Masalah .....	1
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Metode Penelitian .....	2
1.5 Sistematika Pembahasan .....	3
1.6 Relevansi .....	3
<b>BAB 2 DASAR TEORI</b>	
2.1 Kestabilan dalam Sistem Tenaga Listrik .....	5
2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor .....	6
2.1.2 Kestabilan Frekuensi .....	12
2.1.3 Kestabilan Tegangan .....	12
2.2 Kestabilan Transien .....	13
2.3 Pemodelan pada Analisis Kestabilan Transien .....	14
2.3.1 Pemodelan Generator Sinkron .....	14
2.3.2 Pemodelan Beban .....	14
2.4 Persamaan Ayunan dan Dinamika Rotor .....	15
2.5 Beberapa Gangguan yang mempengaruhi Kestabilan .....	19
2.5.1 Menambahkan Beban dengan tiba-tiba .....	19
2.5.2 Hubung Singkat .....	19
2.5.3 Starting Motor .....	20
2.6 Metode Mempertahankan Stabilitas Sistem dari Gangguan .....	20
2.6.1 Pemutus Rangkaian yang Cepat (High Speed CB) .....	20
2.6.2 Pelepasan Beban ( <i>Load Shedding</i> ) .....	20

2.6.3	Mengurangi Reaktansi Seri pada Saluran .....	21
2.7	Critical Clearing Time (CCT) .....	21
2.8	Auto Recloser .....	21
2.8.1	Jenis Auto Reclose Berdasarkan <i>Pole Tripping</i> .....	22
2.8.2	Dead Time atau Waktu Penutupan Kembali.....	22
2.9	Standar yang Berhubungan dengan Kestabilan Transient .....	23
2.9.1	Standar Frekuensi .....	23
2.9.2	Standar Voltage Sag .....	25
2.9.3	Standar Tegangan .....	26
2.9.4	Standar Clearing Time .....	26

### **BAB 3 DATA DAN METODOLOGI**

3.1	Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV pada Tahun 2019 .....	27
3.2	Data Saluran Transmisi Jamali pada Tahun 2019 .....	28
3.3	Kapasitas dan Pembangkitan Jamali pada Tahun 2019 .....	31
3.4	Data Pembebanan GITET Jamali pada Tahun 2019.....	32
3.5	Metodologi Simulasi .....	34

### **BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS**

4.1	Studi Kasus Kestabilan Transien pada Sistem Transmisi Jamali 500 kV pada tahun 2019 .....	37
4.2	Penentuan Waktu Critical Clearing Time.....	41
4.2.1	Pada saat Beban <i>Peak</i> .....	42
4.2.1.1	Saluran Gandul – Lekong (SC 3 Fasa di dekat Bus Gandul).....	43
4.2.1.2	Saluran Muara Tawar – Bekasi (SC 3 Fasa di dekat Bus Muara Tawar) .....	47
4.2.1.3	Saluran Depok – Bogor (SC 3 Fasa di dekat Bus Depok).....	51
4.2.2	Pada saat Beban <i>Light</i> .....	55
4.2.2.1	Saluran Gandul – Lekong (SC 3 Fasa di dekat Bus Gandul).....	56
4.2.2.2	Saluran Depok – Bogor (SC 3 Fasa di dekat Bus Depok).....	60
4.2.2.3	Saluran Muara Tawar – Bekasi (SC 3 Fasa di dekat Bus Muara Tawar) .....	64
4.3	Penentuan Waktu Single Pole Auto Reclosing .....	68

4.3.1	Pada saat Beban <i>Peak</i> , Saluran Muara Tawar – Bekasi (SC 1 Fasa ke Tanah di dekat Bus Muara Tawar).....	68
4.3.2	Pada saat Beban <i>Light</i> , Saluran Muara Tawar – Bekasi (SC 1 Fasa ke Tanah di Bus Muara Tawar).....	71
4.4	Pelepasan Pembangkit .....	73
4.4.1	Pada saat Beban <i>Peak</i> (Generator Bojanegara1 Lepas).....	74
4.4.2	Pada saat Beban <i>Light</i> (Generator Bojanegara1 <i>Delete</i> ).....	76
4.5	Pelepasan Satu Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Gangguan .	78
4.5.1	Pada saat Beban <i>Peak</i> , Saluran Cikupa – Balaraja.....	78
4.5.2	Pada saat Beban <i>Light</i> , Saluran Cikupa – Balaraja.....	80
4.6	Pelepasan Dua Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Gangguan..	82
4.6.1	Pada saat Beban <i>Peak</i> , Saluran Cikupa – Balaraja.....	83
4.6.2	Pada saat Beban <i>Light</i> , Saluran Cikupa – Balaraja.....	85

## **BAB 5 PENUTUP**

5.1.	Kesimpulan .....	89
5.2.	Saran .....	90

## **DAFTAR PUSTAKA .....**

### **LAMPIRAN (DATA EXCITER DAN GOVERNOR)**

### **LAMPIRAN (*SINGLE LINE DIAGRAM*)**

### **BIODATA PENULIS**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# TABLE OF CONTENTS

	PAGE
<b>TITLE</b>	
<b>STATEMENT SHEET</b>	
<b>CERTIFICATION SHEET</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>FOREWORD</b> .....	v
<b>ACKNOWLEDGEMENTS</b> .....	vii
<b>TABLE OF CONTENTS</b> .....	ix
<b>LIST OF FIGURES</b> .....	xiii
<b>LIST OF TABLES</b> .....	xvii
<b>CHAPTER 1 PREFACE</b>	
1.1 Background .....	1
1.2 Problems and Limitations .....	1
1.3 Purpose .....	2
1.4 Research Methods .....	2
1.5 Systematics Discussion .....	3
1.6 Relevance .....	3
<b>CHAPTER 2 BASIC</b>	
2.1 Stability in Electrical Power System .....	5
2.1.1 Rotor Angle Stability .....	6
2.1.2 Frequency Stability .....	12
2.1.3 Voltage Stability .....	12
2.2 Transient Stability .....	13
2.3 Transient Stability Analisis Modeling .....	14
2.3.1 Synchronous Generator Modeling .....	14
2.3.2 Load Modeling .....	14
2.4 Swing Equation and Rotor Dynamics .....	15
2.5 Some Fault Affecting Stability .....	19
2.5.1 Sudden Load Adding .....	19
2.5.2 Short Circuit .....	19
2.5.3 Motor Starting .....	20
2.6 Method Maintaining System Stability from Interference .....	20
2.6.1 High Speed Circuit Breaker (High Speed CB) .....	20

2.6.2	Load Shedding.....	20
2.6.3	Reducing Series Reactance on Lines .....	21
2.7	Critical Clearing Time (CCT) .....	21
2.8	Auto Recloser.....	21
2.8.1	Auto Reclose Type Under Pole Tripping .....	22
2.8.2	Dead Time or Reclose Time .....	22
2.9	Standards Relating Transient Stability .....	23
2.9.1	Frequency Standards.....	23
2.9.2	Voltage Sag Standards.....	25
2.9.3	Voltage Standards.....	26
2.9.4	Clearing Time Standards .....	26

### **CHAPTER 3 DATA AND METHODOLOGY**

3.1	500kV Jawa-Madura-Bali (Jamali) Transmission System by 2019.....	27
3.2	Line Data Jamali Transmission by 2019 .....	28
3.3	Capacity and Generating Jamali by 2019 .....	31
3.4	GITET Load Data Jamali by 2019 .....	32
3.5	Simulation Methodology.....	34

### **CHAPTER 4 SIMULATION AND ANALISYS**

4.1	Transient Stability Case Study at 500kV Jamali Transmission System by 2019 .....	37
4.2	Timing of Critical Clearing Time.....	41
4.2.1	On The Peak Load.....	42
4.2.1.1	Gandul – Lekong Line (3 Phase SC Near Gandul Bus).....	43
4.2.1.2	Muara Tawar – Bekasi Line (3 Phase SC Near Muara Tawar Bus) .....	47
4.2.1.3	Depok – Bogor Line (3 Phase SC Near Depok Bus).....	51
4.2.2	On The Light Load.....	55
4.2.2.1	Gandul – Lekong Line (3 Phase SC Near Gandul Bus).....	56
4.2.2.2	Depok – Bogor Line (3 Phase SC Near Depok Bus).....	60
4.2.2.3	Muara Tawar – Bekasi Line (3 Phase SC Near Muara Tawar Bus) .....	64

4.3	Timing of Single Pole Auto Reclosing .....	68
4.3.1	On The Peak Load, Muara Tawar – Bekasi Line (1 Phase to Ground SC Near Muara Tawar Bus) .....	68
4.3.2	On The Light Load, Muara Tawar – Bekasi Line (1 Phase to Ground SC Near Muara Tawar Bus) .....	71
4.4	Generating Trip.....	73
4.4.1	On The Peak Load (Bojanegara1 Generator Trip) .....	74
4.4.2	On The Light Load (Bojanegara1 Generator Trip) .....	76
4.5	One Circuit Trip of Double Circuit No Fault.....	78
4.5.1	On The Peak Load, Cikupa – Balaraja Line .....	78
4.5.2	On The Light Load, Cikupa – Balaraja Line .....	80
4.6	Two Circuit Trip of Double Circuit No Fault .....	82
4.6.1	On The Peak Load, Cikupa – Balaraja Line .....	83
4.6.2	On The Light Load, Cikupa – Balaraja Line .....	85

## **CHAPTER 5 CLOSING**

5.1.	Conclusion.....	89
5.2.	Recomendation.....	90

<b>REFERENCES</b> .....	91
-------------------------	----

## **ENCLOSURE (EXCITER AND GOVERNOR DATA)**

## **ENCLOSURE (SINGLE LINE DIAGRAM)**

## **BIOGRAPHY**

Halaman ini sengaja dikosongkan

## DAFTAR GAMBAR

### HALAMAN

Gambar 2.1	Kestabilan sistem tenaga.....	6
Gambar 2.2	<i>Single-line</i> diagram generator dan motor.....	7
Gambar 2.3	Diagram impedansi generator dan motor.....	8
Gambar 2.4	Diagram phasor generator dan motor.....	9
Gambar 2.5	Diagram sebagai analisa kestabilan.....	10
Gambar 2.6	Kurva hubungan P dan $\delta$ generator saat gangguan.....	13
Gambar 2.7	Penggambaran rotor pada generator dengan arah putar dari torsi elektrik dan mekanik.....	16
Gambar 2.8	<i>Typical</i> standar <i>abnormal</i> frekuensi untuk generator pembangkit uap untuk frekuensi 60 Hz, IEEE Std C37.106-2003.....	23
Gambar 2.9	Standar <i>Voltage Sag</i> , SEMI F47.....	25
Gambar 3.1	Sistem transmisi Jamali 500 kV pada tahun 2019.....	27
Gambar 3.2	Flow chart metodologi simulasi.....	34
Gambar 4.1	Sudut rotor tidak stabil kritis, CB Open 0.544 detik...	43
Gambar 4.2	Sudut rotor stabil kritis, CB Open 0.543 detik.....	43
Gambar 4.3	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.544 detik.....	44
Gambar 4.4	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.543 detik.....	45
Gambar 4.5	Sudut rotor stabil, CB Open 0.252 detik.....	46
Gambar 4.6	Frekuensi range aman, CB open 0.252 detik.....	46
Gambar 4.7	Sudut rotor tidak stabil kritis, CB Open 0.625 detik...	47
Gambar 4.8	Sudut rotor stabil kritis, CB Open 0.624 detik.....	47
Gambar 4.9	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.625 detik.....	48
Gambar 4.10	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.624 detik.....	49
Gambar 4.11	Sudut rotor stabil, CB Open 0.297 detik.....	50
Gambar 4.12	Frekuensi range aman, CB open 0.297 detik.....	50
Gambar 4.13	Sudut rotor tidak stabil kritis, CB Open 0.586 detik...	51
Gambar 4.14	Sudut rotor stabil kritis, CB Open 0.585 detik.....	51
Gambar 4.15	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.586 detik.....	52
Gambar 4.16	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.585 detik.....	53
Gambar 4.17	Sudut rotor stabil, CB Open 0.262 detik.....	54
Gambar 4.18	Frekuensi range aman, CB open 0.262 detik.....	54
Gambar 4.19	Sudut rotor tidak stabil kritis, CB Open 0.510 detik..	56
Gambar 4.20	Sudut rotor stabil kritis, CB Open 0.509 detik.....	56

Gambar 4.21	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.510 detik.....	57
Gambar 4.22	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.509 detik.....	58
Gambar 4.23	Sudut rotor stabil, CB Open 0.308 detik .....	59
Gambar 4.24	Frekuensi range aman, CB open 0.308 detik.....	59
Gambar 4.25	Sudut rotor tidak stabil kritis, CB Open 0.557 detik ...	60
Gambar 4.26	Sudut rotor stabil kritis, CB Open 0.556 detik .....	60
Gambar 4.27	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.557 detik.....	61
Gambar 4.28	Frekuensi range tidak aman, CB open 0.556 detik.....	62
Gambar 4.29	Sudut rotor stabil, CB Open 0.327 detik .....	63
Gambar 4.30	Frekuensi range aman, CB open 0.327 detik.....	63
Gambar 4.31	Sudut rotor tidak stabil kritis, CB Open 1.017 detik ...	64
Gambar 4.32	Sudut rotor stabil kritis, CB Open 1.016 detik .....	64
Gambar 4.33	Frekuensi range tidak aman, CB open 1.017 detik.....	65
Gambar 4.34	Frekuensi range tidak aman, CB open 1.016 detik.....	66
Gambar 4.35	Sudut rotor stabil, CB Open 0.417 detik .....	67
Gambar 4.36	Frekuensi range aman, CB open 0.417 detik.....	67
Gambar 4.37	Sudut rotor pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka .....	69
Gambar 4.38	Frekuensi pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka .....	69
Gambar 4.39	Tegangan pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka .....	70
Gambar 4.40	Sudut rotor pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka .....	71
Gambar 4.41	Frekuensi pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka .....	72
Gambar 4.42	Tegangan pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka .....	73
Gambar 4.43	Sudut rotor pada generator, generator Bojanegara1 lepas .....	74
Gambar 4.44	Frekuensi pada generator, generator Bojanegara1 lepas .....	75
Gambar 4.45	Tegangan pada bus, generator Bojanegara1lepas.....	75

Gambar 4.46	Sudut rotor pada generator, generator Bojanegara1 lepas .....	76
Gambar 4.47	Frekuensi pada generator, generator Bojanegara1 lepas .....	77
Gambar 4.48	Tegangan pada bus, generator Bojanegara1 Lepas .....	78
Gambar 4.49	Sudut rotor pada generator, ketika pelapasan satu saluran .....	79
Gambar 4.50	Frekuensi pada generator, ketika pelapasan satu saluran .....	79
Gambar 4.51	Tegangan pada bus, ketika pelapasan satu saluran.....	80
Gambar 4.52	Sudut rotor pada generator, ketika pelapasan satu saluran .....	81
Gambar 4.53	Frekuensi pada generator, ketika pelapasan satu saluran .....	81
Gambar 4.54	Tegangan pada bus, ketika pelapasan satu saluran.....	82
Gambar 4.55	Sudut rotor pada generator, ketika pelapasan dua saluran .....	83
Gambar 4.56	Frekuensi pada generator, ketika pelapasan dua saluran .....	84
Gambar 4.57	Tegangan pada bus, ketika pelapasan dua saluran .....	84
Gambar 4.58	Sudut rotor pada generator, ketika pelapasan dua saluran .....	85
Gambar 4.59	Frekuensi pada generator, ketika pelapasan dua saluran .....	86
Gambar 4.60	Tegangan pada generator, ketika pelapasan dua saluran .....	87

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

	HALAMAN
Tabel 2.1	Waktu de-ionisasi..... 22
Tabel 2.2	Standar frekuensi <i>Western Electric Coordinating Council</i> (WECC) untuk frekuensi 60 Hz, IEEE Std C37.106-2003..... 24
Tabel 2.3	Konversi dari standar frekuensi 60 Hz ke 50 Hz..... 24
Tabel 2.4	Durasi <i>Voltage Sag</i> , SEMI F47 ..... 25
Tabel 2.5	Standar tegangan PLN ..... 26
Tabel 3.1	Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali pada tahun 2019..... 28
Tabel 3.2	Data kapasitas pembangkit Jamali pada tahun 2019 ... 31
Tabel 3.3	Data pembebanan GITET transmisi Jamali pada tahun 2019..... 32
Tabel 4.1	Studi kasus kestabilan transien..... 38
Tabel 4.2	Hubung singkat 3 fasa pada kondisi beban <i>peak</i> ..... 39
Tabel 4.3	Hubung singkat 3 fasa pada kondisi beban <i>light</i> ..... 40
Tabel 4.4	Hubung singkat 1 fasa ke tanah pada kondisi beban <i>peak</i> ..... 40
Tabel 4.5	Hubung singkat 1 fasa ke tanah pada kondisi beban <i>light</i> ..... 40
Tabel 4.6	Aliran daya yang dilewati saluran pada kondisi beban <i>peak</i> ..... 41
Tabel 4.7	Aliran daya yang dilewati saluran pada kondisi beban <i>light</i> ..... 41
Tabel 4.8	Hasil simulasi CTT kondisi beban <i>peak</i> ..... 42
Tabel 4.9	Hasil simulasi CTT kondisi beban <i>light</i> ..... 55
Tabel 4.10	Hasil simulasi <i>Single Pole Auto Reclosing</i> , kondisi beban <i>peak</i> ..... 68
Tabel 4.11	Hasil simulasi <i>single pole auto reclosing</i> , kondisi beban <i>light</i> ..... 71

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

PLN melakukan penambahan pembangkit di transmisi listrik Jamali sebesar 13360 MW untuk memenuhi kebutuhan beban 19302 MW dan pengembangan transmisi dengan penambahan GITET Muara Karang, Cigelereng, Cibatu Baru, Pamulang, Tandes dan Krian pada tahun 2019 sebagai solusi untuk mengatasi kenaikan kebutuhan beban yang terus meningkat. Dikarenakan kenaikan pembangkitan listrik secara signifikan dan kebutuhan beban bertambah maka diperlukan analisis kestabilan transien agar sistem dapat tetap terus bekerja pada keadaan yang stabil. Pada analisis kestabilan transien dapat dilihat dari respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan. Pada generator ketika terjadi gangguan apabila sudut rotor tidak stabil dapat menyebabkan generator keluar dari sinkronisasi sistem dan menyebabkan pelepasan generator. Respon frekuensi generator ketika terjadi gangguan tidak boleh melebihi dari *range* aman karena dapat merusak peralatan generator itu sendiri dan merusak peralatan yang disuplai dan tegangan harus berada dalam range yang diijinkan.

Sehingga diperlukan studi kasus untuk mengatasi masalah tersebut maka dilakukan analisis kestabilan transien yaitu dengan gangguan hubung singkat, pelepasan generator, dan pelepasan saluran. Metode yang digunakan adalah *critical clearing time* untuk kasus hubung singkat 3 fasa dan untuk kasus hubung singkat 1 fasa ke tanah dengan menggunakan metode *single pole auto recloser*, sehingga diharapkan pada saat terjadi gangguan respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan masih dalam keadaan stabil serta masih bekerja pada range yang diijinkan.

### 1.2 Permasalahan dan Batasan Masalah

Hal yang menjadi permasalahan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana memperbaiki permasalahan kestabilan transien sistem ketika terjadi gangguan agar respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan tetap stabil dan didalam range yang diijinkan.
2. Bagaimana menentukan waktu untuk pemutusan saluran ketika terjadi gangguan agar sistem kembali stabil.

Untuk menyelesaikan masalah dalam Tugas Akhir ini, maka perlu diberi batasan-batasan sebagai berikut:

1. *Software* yang digunakan adalah ETAP 12.6
2. Analisis dilakukan pada sistem kelistrikan transmisi Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV pada tahun 2019
3. Gangguan yang dianalisa yaitu gangguan hubung singkat 3 fasa dengan *critical clearing time (CCT)* dan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dengan *single pole auto reclosing*, lepasnya salah satu pembangkit, serta gangguan akibat adanya *line trip*.

### **1.3 Tujuan**

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini :

1. Melakukan analisis kestabilan transien sistem kelistrikan transmisi Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV untuk memperoleh rekomendasi yang diperlukan untuk mencapai keandalan dan stabilitas yang layak dan tiap-tiap gangguan yang kemungkinan akan terjadi seperti gangguan lepasnya generator, gangguan hubung singkat dan gangguan *line trip* akan mampu diatasi.
2. Merekomendasikan suatu struktur yang dapat diandalkan pada transmisi kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV dengan sistem kembali stabil setelah gangguan.

### **1.4 Metode Penelitian**

Metodologi yang digunakan pada penelitian Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengambilan Data  
Penulis akan melakukan pengambilan data yang dibutuhkan dari sistem transmisi kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV pada tahun 2019 untuk melakukan analisis transient.
2. Pengolahan data  
Data yang diperoleh digunakan untuk membuat *Single Line Diagram (SLD)* untuk disimulasikan menggunakan *software* ETAP 12.6.
3. Simulasi dan Analisa  
Dilakukan pemodelan skema setelah pengumpulan data kelistrikan dan disimulasikan dengan berbagai bentuk studi kasus yang menyebabkan kegagalan stabilitas transien.
4. Penarikan Kesimpulan dan Penulisan Buku Laporan

Dari hasil analisa penulis dapat menarik kesimpulan jawaban dari permasalahan pada sistem transmisi kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV pada tahun 2019

## **1.5 Sistematika Pembahasan**

Terdapat lima bab pada sistematika pembahasan penulisan dalam buku Tugas Akhir ini, sebagai berikut:

**BAB I** : Pendahuluan

Pada bab pendahuluan ini akan dibahas mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan dan relevansi.

**BAB II** : Dasar Teori

Pada bab ini secara garis besar akan diterangkan teori mengenai stabilitas transient, *Critical Clearing Time* (CCT) dan *single pole auto reclosing*.

**BAB III** : Metodologi dan Data .

Pada bab ini membahas Sistem Transmisi Kelistrikan Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV pada tahun 2019, data saluran transmisi, kapasitas dan pembangkitan, data pembebanan Gidet dan metologi simulasi dengan software ETAP 12.6.

**BAB IV** : Simulasi dan Analisis

Pada bab ini dilakukan simulasi dengan software ETAP 12.6 dengan disimulasikan gangguan generator trip, hubung singkat dan line trip. Dianalisis kestabilan transien dengan memperhatikan respon sudut rotor, frekuensi, dan tegangan.

**BAB V** : Penutup

Pada bab ini dijelaskan mengenai kesimpulan dan saran mengenai analisis kestabilan transient yang telah dibahas.

## **1.6 Relevansi**

Diharapkan dari Tugas Akhir ini mendapatkan hasil yang dapat bermanfaat dan bisa digunakan sebagai referensi pada analisa selanjutnya tentang analisa kestabilan transient sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV pada tahun 2019.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

#### **2.1 Kestabilan dalam Sistem Tenaga Listrik**

Pengertian kestabilan dalam sistem tenaga listrik adalah kesanggupan dari sebuah sistem tenaga listrik atau dari komponennya dapat menjaga sistem tetap sinkron dan seimbang. Pada sistem tenaga listrik pengelompokkan masalah kestabilan dibagi menjadi 3 bagian berkaitan dengan kecil atau besar gangguan dan bentuk dari gangguan, yaitu[1]:

1. Kestabilan *Steady-State*
2. Kestabilan Transien
3. Kestabilan Dinamis

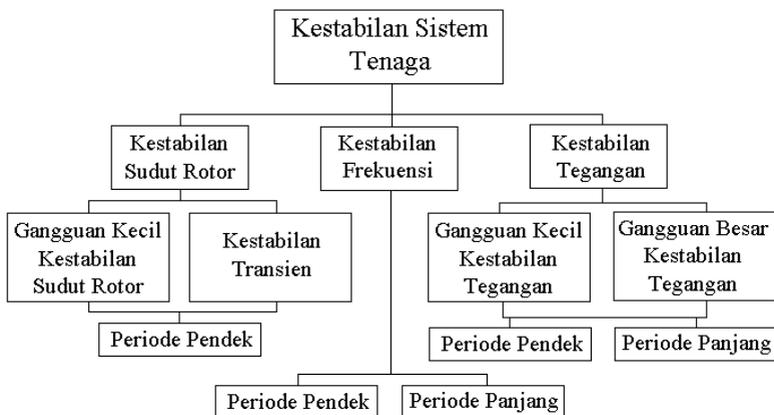
Pada sistem tenaga listrik terdapat 2 kategori gangguan yang menyebabkan masalah kestabilan, yaitu:

1. Gangguan Kecil

Gangguan kecil adalah gangguan dengan perubahan sisi beban atau sisi pembangkit dengan acak, perlahan, dan meningkat atau menurun. Pemutusan jaringan dalam jaringan sistem tenaga listrik merupakan gangguan kecil apabila berpengaruh tidak signifikan sebelum adanya gangguan pada aliran daya di jaringan sistem.

2. Gangguan Besar

Gangguan besar adalah gangguan menyebabkan perubahan secara mendadak di tegangan bus yang seharusnya langsung dihilangkan. Apabila tidak langsung dihilangkan, kestabilan sistem sangat terpengaruh dengan gangguan tersebut. Selain besarnya gangguan, kestabilan sistem terpengaruh dengan panjang waktu gangguan.



**Gambar 2.1** Kestabilan sistem tenaga [2]

Pada Gambar 2.1 yang menjelaskan kestabilan sistem tenaga dengan adanya gangguan kecil maupun besar dapat mempengaruhi operasi sistem sinkron. Misalnya perubahan naik atau turunnya beban secara mendadak merupakan permasalahan gangguan berdampak pada sistem dengan signifikan. Permasalahan lainnya seperti *line trip*, *overload*, dan *short circuit*. Dengan harapan kestabilan sistem mengarah ke adaan stabil dengan waktu yang cepat setelah hilangnya gangguan. Kita menganggap hal tersebut sukses dari penggambaran sesuatu sistem.

### 2.1.1 Kestabilan Sudut Rotor[2]

kestabilan sudut rotor ialah kondisi pada saat setelah adanya gangguan dapat kembali sinkron yang merupakan kemampuan mesin sinkron. Hal tersebut dipengaruhi dengan kemampuan menjaga atau memulihkan keseimbangan dari torsi elektromagnetik dan torsi mekanik dalam sistem tiap mesin sinkron. Sistem yang tidak stabil dapat menyebabkan terjadinya peningkatan ayunan sudut pada beberapa generator yang menimbulkan tidak sinkronisasi generator dengan generator lainnya.

Pada mesin sinkron yang torsi elektromagnetiknya berubah yang disebabkan oleh gangguan dapat diselesaikan kedalam dua komponen, berikut:

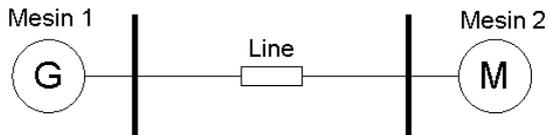
1. Komponen torsi sinkronisasi, dalam fasa dengan deviasi sudut rotor
2. Komponen torsi damping, dalam fasa dengan deviasi kecepatan

Kestabilan sistem bergantung pada kedua komponen torsi tersebut dari tiap-tiap mesin sinkron.

Agar menyederhanakan untuk menganalisis dan agar mendapatkan pengetahuan yang berguna tentang masalah kestabilan, karakterisasi kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua kategori sebagai berikut:

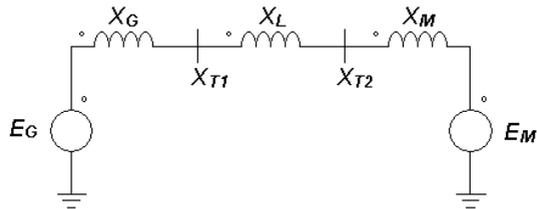
1. Gangguan kecil pada kestabilan sudut rotor berkaitan dengan kapabilitas sistem untuk dapat bertahan sinkronisasi ketika terjadi gangguan kecil. Kestabilan saat gangguan kecil dapat disebabkan dari dua persoalan, yaitu:
  - a. Meningkatnya sudut rotor dikarenakan tanpa isolasi dan tidak berkala yang disebabkan kekurangan torsi sinkronisasi.
  - b. Amplitudo meningkat disebabkan oleh osilasi rotor yang kekurangan torsi damping yang mencukupi.
2. Gangguan besar pada kestabilan sudut rotor atau dapat disebut kestabilan transient adalah kapabilitas sistem untuk dapat bertahan ketika mengalami gangguan besar, seperti hubung singkat di jaringan transmisi, sistem merespon yang dihasilkan adanya sudut rotor pada generator yang besar dan karena hubungan sudut daya yang tidak linier.

Dalam stabilitas sistem tenaga listrik, karakteristik hubungan diantara daya dan posisi rotor adalah karakteristik paling penting dalam mesin sinkron.



**Gambar 2.2** Single-line diagram generator dan motor [3]

Dari Gambar 2.2 adalah *single-line* diagram generator dan motor sistem dua mesin sinkron terhubung melalui transmisi yang mempunyai reaktansi.  $X_L$  adalah reaktansi induktif yang hanya diperhitungkan pada reaktansi saluran pada transmisi dari kasus ini. Karena nilai yang relatif kecil dari kapasitansi dan resistansi pada saluran, maka dapat diabaikan. G mewakili generator sinkron dan M mewakili motor sinkron. Dari Gambar 2.2 impedansi generator dan motor dapat dibentuk sebagai diagram impedansi, pada Gambar 2.3 sebagai berikut:



**Gambar 2.3** Diagram impedansi generator dan motor [3]

Dengan

- $E_M$  adalah tegangan motor internal
- $E_G$  adalah tegangan generator internal
- $X_M$  adalah reaktansi motor internal
- $X_G$  adalah reaktansi generator internal
- $X_T$  adalah reaktansi pada saluran

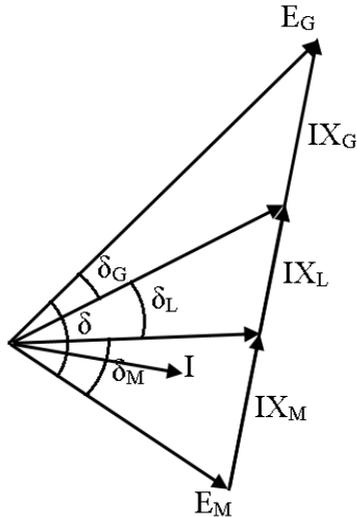
Untuk membedakan sudut  $\delta$  diantara rotor generator dan rotor motor, dengan menggunakan daya generator sebagai penyuplai motor sebagai fungsi pembeda. Terdapat tiga komponen yang membedakan sudut  $\delta$  ialah

1. Sudut generator internal
2. Sudut motor internal
3. Pada generator dan motor terdapat perbedaan sudut tegangan

Sudut ketika medan putar stator didahului oleh rotor pada generator disebut dengan sudut generator internal  $\delta_G$ . Sudut tegangan motor yang didahului oleh tegangan generator dinyatakan sebagai  $\delta_L$ . Dan

$\delta_L$  adalah sudut motor internal yang terjadi ketika medan putar stator mendahului rotor.

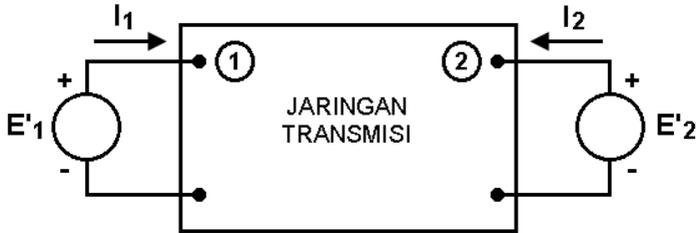
Hubungan diantar tegangan generator internal  $E_G$  dengan tegangan motor internal  $E_M$  dapat ditunjukkan dengan diagram fasor, sebagai berikut:



**Gambar 2.4** Diagram fasor generator dan motor [3]

Pada Gambar 2.4 diagram fasor generator dan motor didapatkan persamaan  $\delta = \delta_G + \delta_L + \delta_M$ , yang dinyatakan kedalam fungsi sudut hubungan daya generator disuplai ke motor.

Dari Gambar 2.3 diubah kedalam bentuk sederhana yang digunakan dalam menganalisa kestabilan agar memudahkan persamaan mendapatkan sudut daya.  $E'_1$  dimisalkan dengan peralihan tegangan generator dan  $E'_2$  dimisalkan dengan tegangan motor. Sebuah kotak dimisalkan sebagai jaringan transmisi, reaktansi motor dan reaktansi generator dijadikan satu, akan terlihat pada Gambar 2.5 sebagai berikut:



**Gambar 2.5** Diagram sebagai analisa kestabilan[3]

Pada Gambar 2.5 diagram sebagai analisa kestabilan akan diperoleh:

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

Berikut ini adalah persamaan untuk aliran daya

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

Setelah itu memberi nilai pada  $k$  dan  $N$  dengan nilai 1 dan 2 secara berturut-turut, dan merubah pada variabel  $V$  dengan variabel  $E'2$  sehingga didapatkan persamaan:

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

Apabila didefinisikan, maka:

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

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad Y_{12} = |Y_{12}| \angle \delta_2 \quad (2.5)$$

Maka diperoleh

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

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

Untuk rel 2 juga diberlakukan pada kedua persamaan dengan cara saling bertukar *subscript*.

Apabila diumpamakan:

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

Sudut baru  $\gamma$  ditetapkan, sebagai berikut:

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

dengan memasukkan ke persamaan (2.6), akan dihasilkan:

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

Apabila persamaan (2.10) ditulis dengan sederhana, maka

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

Variabel  $P_e$  pada persamaan (2.11) untuk mewakili generator sebagai *output* daya listrik dan rugi pada jangkar diabaikan. Pada persamaan ini juga dikenal sebagai persamaan untuk sudut daya.  $\delta$ ,  $P_c$ , dan  $P_{maks}$  pada konfigurasi sebuah jaringan tertentu sebagai konstanta. Sebelumnya telah dijelaskan, unsur semua  $Y_{rel}$  merupakan susceptansi sehingga  $\gamma$  dan  $G_{11}$  nilainya nol dan pada jaringan dimisalkan tidak dianggap resistansi. Reaktansi jala-jala murni didapatkan dari persamaan sudut daya, persamaannya sebagai berikut:

$$P_e = \frac{|E'_{11}||E'_{12}|}{x} \sin \delta \quad (2.12)$$

Maka:

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

Diantara  $E'_1$  dengan  $E'_2$  terdapat reaktansi transfer dengan variabel  $X$  yang terdapat pada Gambar 2.3 diagram impedansi generator dan motor diatas.

### **2.1.2 Kestabilan Frekuensi[2]**

Kestabilan frekuensi merupakan kapabilitas sistem untuk dapat bertahan dengan frekuensi yang stabil pada saat adanya gangguan yang disebabkan oleh antara daya yang dibangkitkan dan daya yang diminta beban yang sangat tidak seimbang. Keadaan tersebut bergantung kepada kapabilitas sistem untuk dapat bertahan atau seimbang kembali antara daya yang dibangkitkan dengan daya yang diminta beban dengan adanya beban yang terlepas. Adanya sistem yang tidak stabil dapat mengakibatkan terjadinya masalah berkelanjutan dari ayunan frekuensi yang dapat mengakibatkan lepasnya generator atau beban.

### **2.1.3 Kestabilan Tegangan[2]**

Kestabilan tegangan ialah kapabilitas sistem untuk dapat bertahan dengan tegangan yang stabil di tiap bus dalam sistem setelah mengalami gangguan dan kembali pada kondisi awal yang ditentukan. Keadaan tersebut bergantung kepada sistem untuk dapat bertahan atau kembali pada keadaan seimbang antara suplai beban dengan permintaan beban dari sistem tenaga. Adanya sistem yang tidak seimbang dapat menyebabkan terjadinya turun atau naiknya tegangan pada beberapa bus. Kemungkinan yang terjadi apabila tegangan tidak stabil mengakibatkan pelepasan beban atau lepasnya transmisi dikarenakan sistem proteksi terlalu cepat bekerja. Tidak sinkronnya antar generator dapat terjadi akibat pelepasan tersebut atau kondisi arus melewati batas yang ditentukan.

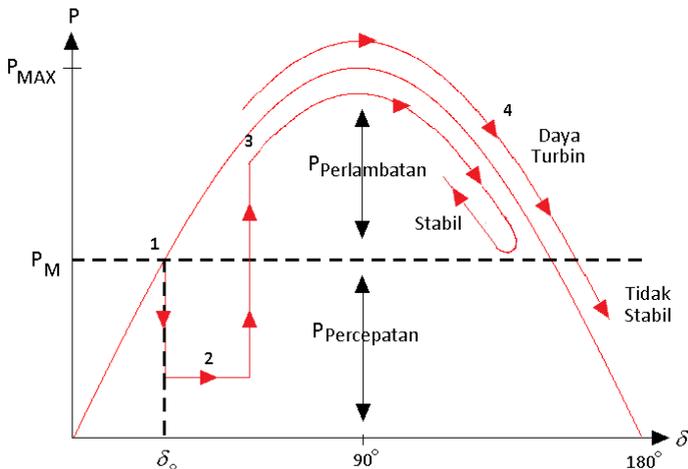
Untuk memudahkan klasifikasi kestabilan tegangan dapat dibagi dalam dua subkategori, yaitu:

1. Gangguan kecil pada kestabilan tegangan ialah kapabilitas untuk bertahan dengan keadaan tegangan yang stabil ketika mengalami gangguan kecil seperti gangguan bertahap penambahan beban sistem.
2. Gangguan besar pada kestabilan tegangan merupakan kapabilitas sistem untuk bertahan dengan tegangan yang stabil ketika adanya gangguan besar, misalnya kesalahan sistem, lepasnya pembangkit, atau lepasnya jaringan transmisi.

## 2.2 Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kapabilitas sistem dapat kembali keposisi yang stabil dengan keadaan kerja yang baru dan bisa diterima oleh sistem, serta kapabilitas dari sistem untuk dapat bertahan dapat sinkron sesudah merasakan gangguan yang besar secara tiba-tiba dalam waktu kurang lebih satu ayunan pertama, AVR dan governor dianggap masih belum bekerja[1].

Analisis kestabilan transien digunakan sebagai mengetahui kapabilitas sistem ketika menahan keadaan transien akibat adanya gangguan yang besar. Analisis transien biasanya dilakukan pada saat adanya konstruksi jaringan transmisi atau penambahan pembangkit baru. Analisis transien berguna untuk melakukan penentuan skema operasi rele yang dibutuhkan, waktu pemutusan kritis untuk *circuit breaker*, kapabilitas mentransfer antar sistem.



**Gambar 2.6** Kurva hubungan P dan  $\delta$  generator saat gangguan[1]

Pada Gambar 2.6 kurva hubungan P dan  $\delta$  diatas memperlihatkan respon dalam generator pada saat terjadi gangguan. Terdapat empat titik kerja pada kurva hubungan P dan  $\delta$ , sebagai berikut:

1. Pada titik ini memperlihatkan keadaan normal sebelum adanya gangguan, keadaan ini generator masih bekerja dengan stabil.
2. Terjadinya gangguan pada keadaan ini yang membuat daya elektrik yang dihasilkan oleh generator menurun dengan sangat drastis. Perbedaan diantara daya elektrik yang dihasilkan oleh generator dengan daya putaran mekanik *primover* menyebabkan percepatan putaran rotor pada generator, menyebabkan perubahan sudut rotor atau daya yang dihasilkan generator bertambah besar.
3. Setelah gangguan telah menghilang, daya yang dihasilkan oleh generator dapat kembali dengan nilai yang sama dengan kurva hubungan P dan  $\delta$ .
4. Pada keadaan ini sesudah berakhirnya gangguan, daya elektrik yang dihasilkan oleh generator meningkat dan melebihi daya pada mekanik *primover*. Keadaan ini menyebabkan melambatnya putaran rotor pada generator.

Apabila mempunyai torsi yang cukup untuk melawan setelah mengalami gangguan yang mampu mengimbangi adanya percepatan ketika muncul pada saat gangguan, maka generator dapat kembali stabil sesudah ayunan pertama serta dapat kembali dalam operasi kerja normal dengan waktu sekitar setengah detik. Apabila tidak memiliki torsi yang cukup atau besar untuk melawan adanya percepatan, maka sudut rotor atau daya dapat terus membesar hingga tidak sinkron terhadap sistem.

## **2.3 Pemodelan pada Analisis Kestabilan Transien**

### **2.3.1 Pemodelan Generator Sinkron [4]**

Model klasik digunakan sebagai pemodelan sederhana generator sinkron untuk menganalisis kestabilan, rotor kutub menonjol pada model klasik dapat diabaikan dan  $E'$  adalah tegangan konstan yang menggambarkan mesin dengan  $X'_d$  adalah transien *direct axis* persen reaktansi.

### **2.3.2 Pemodelan Beban [5]**

Untuk menganalisa kestabilan model beban secara sederhana terbagi menjadi tiga model beban, sebagai berikut:

1. Arus konstan
2. Impedansi konstan
3. Konstan power / konstan kVA

Untuk mengonkrol penyearah dapat digunakan model dengan arus konstan dan pada beban statis dapat digunakan model dengan impedansi konstan. Regulator tidak dipakai untuk beban sebagai jenis model impedansi konstan. Sebagai contoh kipas dan lampu.

Jenis beban-beban yang menjaga daya apabila nilai V atau I nya turun dipakai dengan model konstan power / konstan kVA. Untuk mempertahankan daya yang konstan apabila V turun untuk nilai I dinaikkan. Model konstan kVA dapat digunakan pada motor induksi letaknya jauh dari adanya gangguan. Sebagai contohnya pada industri kimia yang memiliki mesin listrik.

Untuk beban yang selalu menjaga besaran nilai arus agar selalu konstan digunakan model arus konstan.

## 2.4 Persamaan Ayunan dan Dinamika Rotor[4]

Dasar prinsip dinamika yang merupakan persamaan menentukan pergerakan rotor dari mesin sinkron, dinyatakan momen putaran torsi percepatan ialah perkalian percepatan sudut dengan momen inersia pada rotor dapat dilihat pada Gambar 2.7 yaitu Penggambaran rotor pada generator dengan arah putar dari torsi elektrik dan mekanik. Pada generator sinkron, dapat dibentuk dengan persamaan berikut ini:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.14)$$

Dimana

$J$  adalah massa rotor dengan total momen inersia,  $kg \cdot m^2$

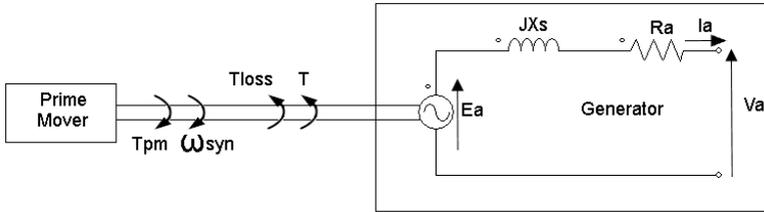
$t$  adalah waktu, detik

$\theta_m$  adalah rotor dengan pergeseran sudut pada sumbu yang tidak bergerak, radian mekanis

$T_a$  adalah percepatan pada momen putar,  $N_m$

$T_e$  adalah momen putar elektromagnetik atau elektrik,  $N_m$

$T_m$  adalah penggerak mula yang memberikan momen putar mekanis dan dikurangi oleh perlambatan momen putar yang dikarenakan oleh rugi putaran,  $N_m$



**Gambar 2.7** Penggambaran rotor pada generator dengan arah putar dari torsi elektrik dan mekanik

Dari persamaan (2.14) pada sumbu yang tidak bergerak untuk mengukur  $\theta_m$ , maka persamaan dalam pengukuran sudut rotor dengan putaran sumbu dengan kecepatan sinkron, sebagai berikut:

$$\theta_m = \omega_m t - \delta_m \quad (2.15)$$

$\theta_m$  merupakan perubahan sudut rotor dengan satuan radian pada putaran sudut terhadap kecepatan sinkron. Dengan menurunkan persamaan (2.15) terhadap  $t$  pada persamaan (2.16) menghitung kecepatan putar pada rotor, sebagai berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.16)$$

Dengan persamaan (2.14) dan (2.16) didapatkan

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.17)$$

Dengan mengalikan persamaan (2.17) dengan  $\omega_m$ , didapatkan

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.18)$$

$J\omega_m$  merupakan momentum sudut rotor dideklarasikan dengan simbol  $M$ . Hubungan massa yang berputar dengan energi kinetik adalah

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (2.19)$$

Atau

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

Apabila sebelum kehilangan stabilitas,  $\omega_m$  tidak mengalami perubahan. Sehingga  $M$  terhadap kecepatan sinkron adalah

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

Hubungan momen sudut dengan persamaan ayunan, sebagai berikut:

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.22)$$

$P$  merupakan jumlah kutub yang ada pada generator sinkron, sehingga hubungan sudut daya mekanis  $\delta_m$  dengan sudut daya listrik  $\delta$ , sebagai berikut:

$$\delta = \frac{P}{2} \delta_m \quad (2.23)$$

Sehingga sudut daya listrik dihubungkan dengan persamaan ayunan, sebagai berikut:

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

Apabila mensubstitusikan persamaan (2.22) dengan persamaan (2.24) setelah itu dibagi dengan  $S_B$  merupakan daya besar. Sehingga persamaannya adalah

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

Energi kinetik atau MJ didefinisikan dari konstanta H dengan rating mesin atau MVA yang membagi kecepatan sinkron dengan persamaan berikut:

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

Disubstitusikan persamaan (2.26) dengan persamaan (2.25), sehingga persamaannya adalah

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

Hubungan kecepatan putar mekanis dengan kecepatan elektris adalah  $\omega_{sm} = \frac{2}{p} \omega_0$ , kemudian persamaannya sebagai berikut:

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

Dengan  $\delta$  merupakan angular posisi pada rotor di dalam radian elektrik dengan hubungan  $\delta_0$  dan putaran sinkron yang merupakan hasil nilai disaat  $t = 0$ , sehingga persamaannya adalah

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

Apabila menurunkan persamaan (2.29) terhadap waktu, maka persamaannya sebagai berikut:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 = \Delta \omega_r \quad (2.30)$$

Maka

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta \omega_r)}{dt} \\ &= \omega_0 \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_0 \frac{d(\Delta \bar{\omega}_r)}{dt} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Apabila pada persamaan (2.28) disertakan torsi peredam, sehingga persamaan ayunannya adalah

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e - K_D \Delta \bar{\omega}_r \quad (2.32)$$

## **2.5 Beberapa Gangguan yang mempengaruhi Kestabilan**

### **2.5.1 Menambahkan Beban dengan tiba-tiba**

Gangguan peralihan terjadi apabila pada sistem tenaga listrik dengan menambahkan beban secara tiba-tiba dengan hal-hal berikut:

1. Apabila ayunan sistem telah melewati titik kestabilan kritis yang tidak dapat kembali stabil, terjadi karena menaikkan beban sampai terjadi isolasi.
2. Pada kondisi reaktansi rangkaian dan kondisi tegangan tertentu ketika beban melewati batas kestabilan dengan keadaan yang mantap.

Apabila dengan tiba-tiba melakukan penambahan beban secara penuh, frekuensi dapat menurun dengan sangat cepat dikarenakan membutuhkan arus yang besar. Dengan keadaan tersebut meskipun nilai beban belum menjangkau daya maksimumnya, mengakibatkan sistem tidak sinkron. Pada kasus ini diakibatkan keluaran generator yaitu daya elektrik jauh melewati input generator yaitu daya mekanik atau pnggerak mula yang menghasilkan daya dan memakai energi kinetik dari generator untuk menyuplai kekurangannya. Akibatnya pada sistem frekuensi akan menurun dan putaran generator akan menurun. Generator tidak stabil atau tidak sinkron yang diakibatkan sudut daya melewati titik kritis kestabilan. Pada rotor generator mendapatkan guncangan yang besar dan ayunan yang besar, ketika dilakukan penambahan beban tersebut.

### **2.5.2 Hubung Singkat [5]**

Pada sistem tenaga listrik gangguan yang sering terjadi adalah gangguan disebabkan hubung singkat. Bebrapa penyebab terjadinya hubung singkat dikarenakan kegagalan isolasi, sambaran petir, binatang dan pohon tumbang atau ranting pohon.

Aliran arus yang sangat besar pada titik gangguan timbul dikarenakan hubung singkat sehingga pada sekitar titik gangguan secara signifikan tegangan menurun. Motor induksi dan generator memberikan arus kontribusi yang menyebabkan aliran arus yang besar pada titik gangguan.

### **2.5.3 Starting Motor**

Ketika motor melakukan *starting* arus yang dipakai oleh motor 5 – 6 kali dari arus nominalnya sampai putaran motor 80 – 90 % dari kecepatan normalnya. *Starting* motor dapat mengganggu kestabilan sistem karena mengakibatkan penurunan tegangan atau *voltage drop* pada sistem tenaga listrik.

*Starting* motor yang mengakibatkan penurunan tegangan dapat memperpendek usia peralatan dan berpengaruh kerja pada peralatan tersebut. Kestabilan sistem dapat terganggu ketika terjadinya drop tegangan yang telah melampaui standar atau batas yang dipakai pada peralatan kelistrikan.

## **2.6 Metode Mempertahankan Stabilitas Sistem dari Gangguan**

### **2.6.1 Pemutus Rangkaian yang Cepat (*High Speed Circuit Breaker*)**

Kestabilan pada sistem kelistrikan akan menjadi lebih baik apabila gangguan dengan cepat dapat dihilangkan. Pada teori sama luas, apabila luas area yang diredam (A2) lebih luas atau luasnya sama dengan area percepatan (A1), maka sistem akan stabil setelah gangguan. Untuk menentukan luas area yang diredam dan area percepatan ditentukan oleh waktu memutuskan atau mengisolir area gangguan. Sehingga syarat untuk sistem tetap stabil luasan area percepatan dibuat semakin kecil mungkin dibandingkan luas area yang diredam.

### **2.6.2 Pelepasan Beban (*Load Shedding*)**

Dalam menghindari keadaan *collapse* pada sistem tenaga listrik maka digunakan metode pelepasan beban. Gangguan yang biasa terjadi yang menyebabkan sistem *collapse* adalah pelepasan pembangkit, sehingga sistem tidak dapat menanggung daya kebutuhan beban. Tujuan pelepasan beban agar daya yang disuplai seimbang dengan daya kebutuhan beban, ada dua cara pelepasan beban yaitu:

1. Pelepasan beban secara otomatis
2. Pelepasan beban secara manual

### **2.6.3 Mengurangi Reaktansi Seri pada Saluran**

Apabila mengurangi reaktansi seri pada saluran, stabilitas sistem akan semakin meningkat dikarenakan daya yang dapat disalurkan pada saluran semakin besar, sehingga dapat memperbaiki kestabilan transien pada sistem

### **2.7 Critical Clearing Time (CCT)**

Pemutusan waktu kritis atau *critical clearing time* (CCT) adalah waktu untuk menghilangkan gangguan dengan waktu yang kritis diantara keadaan stabil dan tidak stabil dengan melihat sudut rotor pada generator untuk bisa tetap sinkron dalam sistem interkoneksi. Apabila gangguan dihilangkan sebelum waktu kritis maka sistem akan stabil apabila gangguan dihilangkan melebihi waktu kritis maka sistem tidak stabil sehingga dapat lepas dari sistem.

Pada generator dengan meningkatkan torsi input sampai sudut rotor lebih dari  $90^\circ$  akan menyebabkan slip pole dan akan kehilangan sinkronisasi dengan sistem, dengan asumsi beban elektrik konstan. Ketika terjadi gangguan sudut rotor dapat berhenti dengan sudut rotor lebih dari  $90^\circ$ , atau pada keadaan transien ayunan sudut rotor bisa lebih dari  $180^\circ$  maka menyebabkan slip pole. Apabila gangguan tidak segera dihilangkan maka mesin akan terus terjadi *slipping pole* dan akan keluar dari sinkronisasi dengan sistem.

Jika ayunan sudut rotor tidak melebihi  $180^\circ$  atau apabila gangguan yang menyebabkan ayunan rotor segera dihilangkan, mesin mungkin tetap sinkron dengan sistem. Pada sudut rotor kemudian akan berisolasi dengan ayunan menurun hingga nilainya menetap dibawah  $90^\circ$ . [6]

### **2.8 Auto Recloser [7]**

Auto recloser atau penutup kembali otomatis merupakan rele yang terdapat pada sistem proteksi yang bekerja untuk menyampaikan tugas ke CB untuk dapat menutup kembali setelah pemadaman busur api pada CB proteksi fasa terbuka yang disebabkan adanya gangguan yang bersifat sementara.

Untuk menjaga kestabilan sistem dan ketersediaan daya yang disalurkan dalam sistem, dengan cara menghilangkan gangguan dengan

Cara membuka CB pada kedua sisi saluran dan dengan segera dilakukan penutupan kembali CB dengan otomatis (*Auto Reclose*). *Auto Reclose* dibutuhkan dikarenakan sabagai besar terjadi gangguan yang sifatnya sementara pada penyaluran udara ekstra tinggi dan tegangan tinggi.

### 2.8.1 Jenis *Auto Reclose* Berdasarkan *Pole Tripping*

1. *Single pole auto reclose* (SPAR) bekerja karena gangguan 1 fasa ke tanah
2. *Three pole auto reclose* (TPAR) bekerja karena gangguan fasa-fasa

### 2.8.2 *Dead Time* atau Waktu Penutupan Kembali

*Dead time* atau waktu penutupan kembali merupakan waktu penundaan CB untuk menutup kembali setelah CB trip untuk menghilangkan gangguan. Waktu yang penundaan penutupan kembali dapat dipengaruhi hal berikut:

1. Waktu minimal yang digunakan untuk menghilangkan deionisasi dan busur api setelah CB trip
2. Waktu maksimal berdasarkan kestabilan pada sistem

**Tabel 2.1** Waktu de-ionisasi

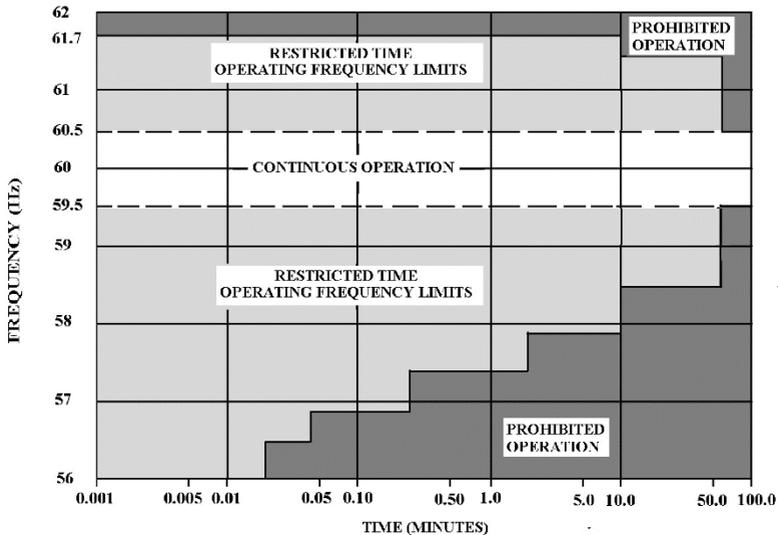
Tegangan Sistem (kV)	Waktu De-ionisasi (detik)
66	0.25
150	0.30
275	0.37
500	0.50

Dengan mengacu Tabel 2.1 waktu de-ionisasi sehingga untuk menentukan waktu *dead time* atau waktu penutupan kembali sebagai berikut:

1. Jenis *single pole auto reclose* (SPAR) dengan waktu 0.8 – 1 detik
2. Jenis *three pole auto reclose cepat* (TPAR *high speed*) dengan waktu 1 – 2 detik
3. Jenis *three pole auto reclose lambat* (TPAR *low speed*) dengan waktu 2 – 3 detik

## 2.9 Standar yang Berhubungan dengan Kestabilan Transient

### 2.9.1 Standar Frekuensi [8]



**Gambar 2.8** Typical standar *abnormal* frekuensi untuk generator pembangkit uap untuk frekuensi 60 Hz, IEEE Std C37.106-2003

Pada Gambar 2.8 adalah typical standar *abnormal* frekuensi untuk generator pembangkit uap untuk frekuensi 60 Hz, IEEE Std C37.106-2003 untuk daerah yang berwarna paling gelap merupakan daerah yang terlarang atau *prohibited operation* untuk *abnormal* frekuensi dan daerah yang berwarna sedikit gelap merupakan daerah yang masih diperbolehkan untuk *abnormal* frekuensi tetapi dalam batasan durasi waktu. Untuk keadaan *steady state* terdapat pada daerah *continous operation*.

**Tabel 2.2** Standar frekuensi *Western Electric Coordinating Council* (WECC) untuk frekuensi 60 Hz, IEEE Std C37.106-2003

<i>Underfrequency limit</i>	<i>Overfrequency limit</i>	<i>Minimum time</i>
60.0 – 59.5 Hz	60.0 – 60.5 Hz	N/A ( <i>continuous operating range</i> )
59.4 – 58.5 Hz	60.6 – 61.5 Hz	3 <i>minutes</i>
58.4 – 57.9 Hz	61.6 – 61.7 Hz	30 <i>seconds</i>
57.8 – 57.4 Hz		7.5 <i>seconds</i>
57.3 – 56.9 Hz		45 <i>cycles</i>
56.8 – 56.5 Hz		7.2 <i>cycles</i>
<i>Less than 56.4 Hz</i>	<i>Greater than 61.7 Hz</i>	<i>Instantaneous trip</i>

Dari Tabel 2.2 adalah standar untuk frekuensi 60 Hz terdapat durasi waktu yang diijinkan untuk *underfrequency limit* dan *overfrequency limit*. Untuk frekuensi kurang dari 56.4 Hz dan frekuensi lebih dari 61.7 Hz maka diwajibkan melakukan *instantaneous trip* pada CB. Pada frekuensi nominal ketika steady state diijinkan frekuensi 59.5 Hz sampai 61.7 Hz.

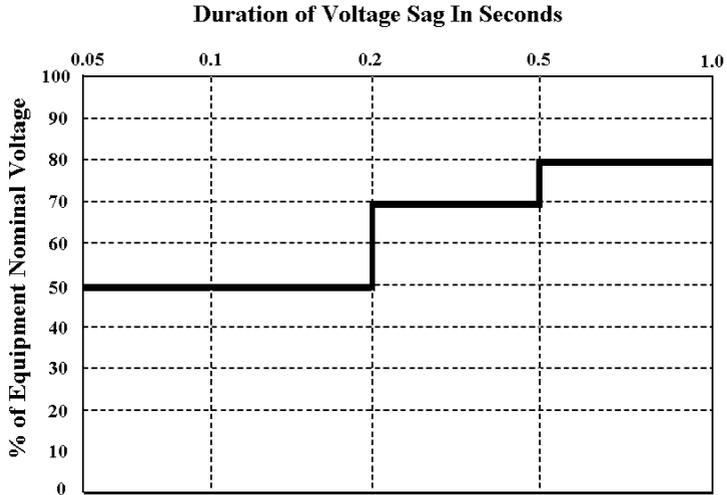
Pada tugas akhir ini digunakan standar 50 Hz sehingga pada standar frekuensi 60 Hz IEEE Std C37.106-2003 di konversi kedalam frekuensi 50 Hz dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut:

**Tabel 2.3** Konversi dari standar frekuensi 60 Hz ke 50 Hz

<i>Underfrequency limit</i>	<i>Overfrequency limit</i>	<i>Minimum time</i>
50 – 49.583 Hz	50 – 50.417 Hz	N/A ( <i>continuous operating range</i> )
49.5 – 48.75 Hz	50.5 – 51.25 Hz	3 <i>minutes</i>
48.667 – 48.25 Hz	51.333 – 51.417 Hz	30 <i>seconds</i>
48.167 – 47.833 Hz		7.5 <i>seconds</i>
47.75 – 47.417 Hz		45 <i>cycles</i>
47.333 – 47.083 Hz		7.2 <i>cycles</i>
<i>Less than 47 Hz</i>	<i>Greater than 51.417 Hz</i>	<i>Instantaneous trip</i>

### 2.9.2 Standar Voltage Sag[9]

*Voltage Sag* atau kedip tegangan merupakan efek dari transien dikarenakan adanya gangguan misalnya gangguan hubung singkat, *starting* motor, pelepasan jaringan atau penambahan beban. Berikut ini adalah Gambar 2.9 standar *voltage sag* SEMI F47



**Gambar 2.9** Standar *Voltage Sag*, SEMI F47

**Tabel 2.4** Durasi *Voltage Sag*, SEMI F47

VOLTAGE SAG DURATION				VOLTAGE SAG
Second (s)	Milliseconds (ms)	Cycles at 60 hz	Cycles at 50 hz	Percent (%) of Equipment Nominal Voltage
<0.05 s	<50	<3	<2.5	Not specified
0.05 to 0.2 s	50 to 200	3 to 12	2.5 to 10	50%
0.2 to 0.5 s	200 to 500	12 to 30	10 to 25	70%
0.5 to 1.0 s	500 to 1000	30 to 60	25 to 50	80%
>1.0 s	>1000	>60	>50	Not specified

Pada standar *voltage sag* SEMI F47 pada Gambar 2.9 terdapat durasi lama waktu kedip tegangan, untuk kedip tegangan 50% dari nominal diperbolehkan selama 0.2 detik, untuk kedip tegangan 70% selama 0.5 detik, dan 80% selama 1 detik. Agar lebih mudah memahami dapat dilihat pada Tabel 2.4 durasi *Voltage Sag*, SEMI F47.

### 2.9.3 Standar Tegangan

Untuk menganalisa tegangan nominal yang diperbolehkan untuk sistem penyaluran di Indonesia maka menggunakan standar dari PLN, pada saat tegang berada pada keadaan steady state atau tegangan nominal maka sistem diwajibkan menjaga tegangan yang dapat dilihat pada Tabel 2.5 standar tegangan PLN berikut ini:

**Tabel 2.5** Standar tegangan PLN

Tegangan (kV)	Overvoltage	Undervoltage
20	+5%	-10%
70	+5%	-10%
150	+5%	-10%
500	+5%	-5%

### 2.9.4 Standar Clearing Time[10]

Ketika adanya gangguan diharapkan pemutus saluran dapat bekerja dengan cepat pada sistem kelistrikan. Waktu yang dipakai untuk *clearing time* berdasarkan standar SPLN No 52-1 Tahun 1983. Pada sistem tegangan, sebagai berikut:

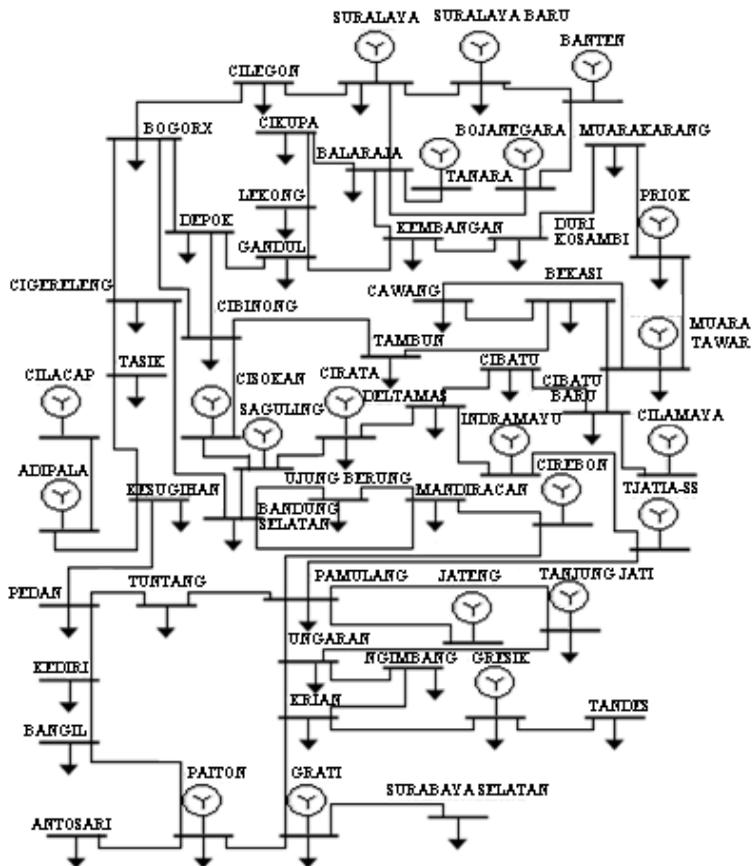
1. 70 kV *clearing time*  $\leq$  150 mili detik
2. 150 kV *clearing time*  $\leq$  120 mili detik
3. 275 kV *clearing time*  $\leq$  100 mili detik
4. 500 kV *clearing time*  $\leq$  90 mili detik

Pengaman cadangan terhadap gangguan yang digunakan untuk *clearing time* adalah 500 mili detik.

## BAB 3 DATA DAN METODOLOGI

### 3.1 Sistem Transmisi Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV pada Tahun 2019

Untuk menganalisa kestabilan transien pada sistem transmisi Jamali 500kV pada tahun 2019 dapat digambarkan pada Gambar 3.1 dengan menggunakan *single line diagram*, pada berikut ini:



**Gambar 3.1** Sistem transmisi Jamali 500 kV pada tahun 2019

### 3.2 Data Saluran Transmisi Jamali pada Tahun 2019

Untuk melakukan simulasi dibutuhkan data saluran antar bus interkoneksi, pada tabel 3.1 menunjukkan data impedansi per kilometernya.

**Tabel 3.1.** Data saluran sistem interkoneksi 500 kV Jamali pada tahun 2019

DARI BUS	KE BUS	R (Ohm)	X (Ohm)	Y (Siemen)	JARAK (km)
BALARAJA	KEMBANGAN	0.010110	0.123840	0.0000096	32.85
BALARAJA	CIKUPA	0.010110	0.123840	0.0000096	9.25
BANDUNG SEL	SAGULING	0.012903	0.124794	0.0000095	39
BANDUNG SEL	UJUNG BERNG	0.031013	0.281756	0.0000040	32.89
BANTEN	SURALAYA-BR	0.015422	0.125518	0.0000094	0.87
BANTEN	BOJANEGARA	0.015422	0.125518	0.0000094	11.61
BEKASI	TAMBUN	0.015422	0.125518	0.0000094	10.56
BEKASI	CAWANG	0.031013	0.281756	0.0000040	16.84
BEKASI	MUARA TAWR	0.031013	0.281756	0.0000040	12.93
BOGORX	DEPOK	0.015422	0.125518	0.0000094	25.54
BOGORX	CIGERELENG	0.015422	0.125518	0.0000094	92.91
BOGORX	CILEGON	0.031013	0.281756	0.0000040	115.26
BOGORX	CIBINONG	0.031013	0.281756	0.0000040	22.47
BOJANEGARA	BALARAJA	0.015422	0.125518	0.0000094	60
CAWANG	MUARA TAWR	0.015422	0.125518	0.0000094	48
CIBATU	CIBATU BARU	0.012903	0.124794	0.0000095	5
CIBATU	DELTAMAS	0.012903	0.124794	0.0000095	2
CIBINONG	CISOKAN	0.012903	0.124794	0.0000095	68.61
CIGERELENG	TASIK	0.012903	0.124794	0.0000095	85.01
CIGERELENG	BANDUNG SEL	0.012903	0.124794	0.0000095	12.78

DARI BUS	KE BUS	R (Ohm)	X (Ohm)	Y (Siemen)	JARAK (km)
CIKUPA	LEKONG	0.010110	0.123840	0.0000096	20
CILACAP	ADIPALA	0.010110	0.123840	0.0000096	4.79
CILAMAYA	CIBATU BARU	0.010110	0.123840	0.0000096	45.67
CIRATA	DELTAMAS	0.012903	0.124794	0.0000095	43.1
CIRATA	SAGULING	0.015422	0.125518	0.0000094	25.17
CISOKAN	SAGULING	0.012903	0.124794	0.0000095	19.52
DEPOK	CIBINONG	0.015422	0.125518	0.0000094	15.57
DURIKOSAMBI	MUARA KRNG	0.010110	0.123840	0.0000096	15
DURIKOSAMBI	KEMBANGAN	0.010110	0.123840	0.0000096	3
GANDUL	LEKONG	0.015422	0.125518	0.0000094	16
GANDUL	DEPOK	0.015422	0.125518	0.0000094	5.92
GRATI	KRIAN	0.012903	0.124794	0.0000095	79.41
GRATI	SBSEL	0.015422	0.125518	0.0000094	54.5
GRESIK	TNDES	0.012903	0.124794	0.0000095	10.5
GRESIK	KRIAN	0.015422	0.125518	0.0000094	23.9
IDMYU	DELTAMAS	0.010110	0.123840	0.0000096	90.17
IDMYU	TJATIA-SS	0.010110	0.123840	0.0000096	91.42
KEDIRI	BANGIL	0.012903	0.124794	0.0000095	85.7
KEMBANGAN	GANDUL	0.012903	0.124794	0.0000095	30.14
KESUGIHAN	ADIPALA	0.010110	0.123840	0.0000096	13.83
KESUGIHAN	PEDAN	0.012903	0.124794	0.0000095	196
MANDIRACAN	CIREBON	0.010110	0.123840	0.0000096	10
MANDIRACAN	PEMALANG	0.010110	0.123840	0.0000096	167
MANDIRACAN	BANDUNG SEL	0.010110	0.123840	0.0000096	119.3
MANDIRACAN	UJUNG BERNG	0.031013	0.281756	0.0000040	86.43

DARI BUS	KE BUS	R (Ohm)	X (Ohm)	Y (Siemen)	JARAK (km)
MUARA TAWR	CIBATU BARU	0.012903	0.124794	0.0000095	34.37
NGIMBANG	KRIAN	0.031013	0.281756	0.0000040	50.98
PAITON	WATUDODOL	0.010110	0.123840	0.0000096	131
PAITON	BANGIL	0.012903	0.124794	0.0000095	93.42
PAITON	GRATI	0.012903	0.124794	0.0000095	88.36
PEDAN	KEDIRI	0.012903	0.124794	0.0000095	204.5
PEDAN	TUNTANG	0.012903	0.124794	0.0000095	56
PEMALANG	JTENG	0.010110	0.123840	0.0000096	20
PEMALANG	TJATIA-SS	0.010110	0.123840	0.0000096	132
PRIOK	MUARA KRNG	0.010110	0.123840	0.0000096	10
PRIOK	MUARA TAWR	0.010110	0.123840	0.0000096	15
SEGARARUPEK	ANTOSARI	0.010110	0.123840	0.0000096	102.4
SURALAYA	SURALAYA-BR	0.010110	0.123840	0.0000096	1.25
SURALAYA	CILEGON	0.012903	0.124794	0.0000095	12.5
SURALAYA	BALARAJA	0.015422	0.125518	0.0000094	62.76
TAMBUN	CIBINONG	0.015422	0.125518	0.0000094	21.91
TANARA	BALARAJA	0.010110	0.123840	0.0000096	20.98
TANJUNG JATI	PEMALANG	0.010110	0.123840	0.0000096	181.2
TASIK	KESUGIHAN	0.012903	0.124794	0.0000095	108.5
UNGARAN	TANJUNG JATI	0.012903	0.124794	0.0000095	134.8
UNGARAN	PEMALANG	0.012903	0.124794	0.0000095	71.13
UNGARAN	TUNTANG	0.012903	0.124794	0.0000095	22
UNGARAN	KRIAN	0.015422	0.125518	0.0000094	254.2
UNGARAN	NGIMBANG	0.031013	0.281756	0.0000040	200.34
WATUDODOL	SEGARARUPEK	0.011160	0.124705	0.0000095	4.12

### 3.3 Kapasitas dan Pembangkitan Jamali pada Tahun 2019

Pada sistem kelistrikan Jamali pada tahun 2019 terdapat data kapasitas dan pembangkitan dapat dilihat pada Tabel 3.2 sebagai berikut:

**Tabel 3.2** Data kapasitas pembangkit Jamali pada tahun 2019

no	BUS PEMBANGKIT	KAPASITAS	PEAK (MW)	LIGHT (MW)
		(MW)		
1	SURALAYA BARU	588	370	185
2	SURALAYA	3612.5	1585	790
3	MUARA TAWAR	2889.2	1070	535
4	TANJUNG JATI	4887.2	2270	1135
5	GRESIK	1680	750	375
6	CIRATA	1008	260	130
7	GRATI	710	560	280
8	SAGULING	700.74	160	80
9	ADIPALA	637.5	400	200
10	CILACAP	1637.5	1070	535
11	PAITON	4792.8	2440	1220
12	PRIOK	800	550	275
13	BOJANEGARA	2000	1350	675
14	TANARA	2000	1350	675
15	CIREBON	1000	670	335
16	INDRAMAYU	1000	670	335
17	TJATIA-SS	1320	800	400
18	CISOKAN	1040	540	270
19	CILAMAYA	1600	1010	505
20	JATENG	1900	1150	575
21	BANTEN	669.8	400	200

### 3.4 Data Pembebanan GITET Jamali pada Tahun 2019

Data pembebanan tiap GITET pada transmisi Jamali pada tahun 2019, terdapat data pembebanan *peak* dan *light* pada Tabel 3.3 sebagai berikut:

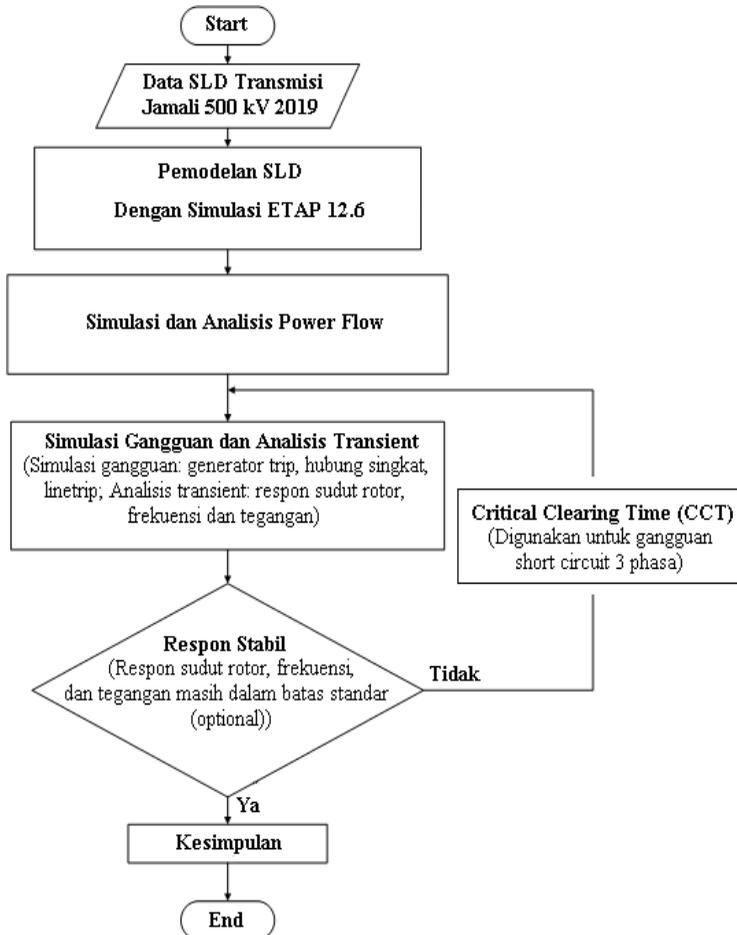
**Tabel 3.3** Data pembebanan GITET transmisi Jamali pada tahun 2019

no	GITET	PEAK (MW)	LIGHT (MW)
1	SURALAYA	27.9	13.95
2	SURALAYA BARU	65.9	32.95
3	MUARAKARANG	217.3	108.65
4	CILEGON	392.4	196.2
5	BALARAJA	901.9	450.95
6	CIKUPA	591.2	295.6
7	LEKONG	620.4	310.2
8	DURI KOSAMBI	542	271
9	PRIOK	624.4	312.2
10	KEMBANGAN	422.6	211.3
11	GANDUL	1094.6	547.3
12	DEPOK	440.9	220.45
13	BOGORX	212.7	106.35
14	BEKASI	348.4	174.2
15	CAWANG	691.3	345.65
16	MUARA TAWAR	285.4	142.7
17	TAMBUN	440.3	220.15
18	CIBINONG	475.2	237.6
19	CIGERELENG	353.1	176.55
20	TASIK	358.8	179.4

no	GITET	PEAK (MW)	LIGHT (MW)
21	CIBATU BARU	328.5	164.25
22	CIBATU	803.5	401.75
23	DELTAMAS	412.8	206.4
24	CIRATA	182.2	91.1
25	MANDIRACAN	360.4	180.2
26	UJUNG BERUNG	352.7	176.35
27	BANDUNG SELATAN	165.5	82.75
28	KESUGIHAN	734	367
29	PAMULANG	307.9	153.95
30	UNGARAN	118.9	59.45
31	TANJUNG JATI	507.5	253.75
32	TUNTANG	435.1	217.55
33	PEDAN	548.2	274.1
34	NGIMBANG	487.9	243.95
35	TANDES	263.5	131.75
36	GRESIK	44.8	22.4
37	KRIAN	864.2	432.1
38	SURABAYA SELATAN	495.4	247.7
39	GRATI	443.5	221.75
40	KEDIRI	710.2	355.1
41	BANGIL	418.9	209.45
42	PAITON	515.5	257.75
43	ANTOSARI	694.3	347.15

### 3.5 Metodologi Simulasi

Untuk mendapatkan hasil yang diharapkan simulasi dibutuhkan sebuah metodologi untuk mengetahui langkah-langkah untuk melakukan simulasi sebelum memasuki tahap simulasi dan analisa. Berikut ini adalah etodologi simulasi yang digunakan untuk tugas akhir ini



**Gambar 3.2** Flow chart metodologi simulasi

Pada Gambar 3.2 adalah *flow chat* metodologi simulasi yang dipakai untuk tugas akhir ini, dapat diuraikan berikut ini:

1. Aliran Daya  
Untuk mengetahui aliran daya pada sistem stabil atau tidak dilakukan analisa aliran daya dengan menggunakan *software* ETAP pada tugas akhir ini menggunakan ETAP versi 12.6.0. Analisa aliran disimulasikan dengan menggunakan data-data beban, data saluran, dan data pembangkitan dari data sistem transmisi Jamali 500 kV.
2. Simulasi Kestabilan Transien  
Pada simulasi kestabilan transien pada tugas akhir ini terdapat tiga gangguan untuk menganalisa kestabilan transien sistem Jamali 500 kV pada tahun 2019 yaitu hubung singkat di saluran, pelepasan generator, dan saluran *trip*.
3. Analisis kestabilan transien  
Setelah dilakukan simulasi kestabilan transien hasil yang diamati adalah sudut rotor, frekuensi dan tegangan dengan mengamati respon terhadap waktu menggunakan batasan-batasan sesuai dari standar yang ditetapkan. Pada gangguan yang disebabkan oleh hubung singkat 3 fasa dicari waktu pemutusan kritis *circuit breaker* (CB) membuka, apabila sistem masih stabil maka diperlambat waktu pemutusan saluran dan apabila sistem tidak stabil maka dipercepat waktu pemutusan saluran hingga ditemukan waktu pemutusan saluran diantara sistem stabil dan tidak stabil.
4. Penarikan Kesimpulan  
Dengan adanya tambahan pembangkit di transmisi listrik Jamali dengan 13360 MW sistem transmisi Jamali 500 kV pada tahun 2019 dapat diberikan hasil kesimpulan untuk analisis kestabilan transien dan dapat memberikan solusi dalam memperbaiki masalah tersebut.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 4**

### **SIMULASI DAN ANALISIS**

#### **4.1 Studi Kasus Kestabilan Transien pada Sistem Transmisi Jamali 500 kV pada tahun 2019**

Setelah diperoleh pemodelan sistem transmisi Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500 kV dalam *single line diagram* (SLD) dengan menggunakan *software* ETAP 12.6, selanjutnya dapat menganalisa kestabilan transien dengan studi kasus yang meliputi *critical clearing time* (CCT), *single pole auto recloser*, pelepasan pembangkit, pelepasan satu saluran dari saluran ganda dan pelepasan dua saluran dari saluran ganda. Pada percobaan tugas akhir ini gangguan disimulasikan pada detik ke 1 detik. Berikut ini adalah studi kasus yang dianalisa kestabilan transiennya adalah

##### **1. Critical Clearing Time (CCT)**

Kasus ini dilakukan analisa kestabilan transien pada kondisi beban *peak* dan beban *light* masing-masing tiga kali percobaan. Percobaan dilakukan di tiga bus yang memiliki arus hubung singkat 3 fasa terbesar, yang disimulasikan gangguan berada pada saluran dan dicari waktu pemutusan gangguan kritisnya. Apabila terdapat kasus pada saluran ganda, hanya satu saluran yang terkena gangguan hubung singkat 3 fasa dan diikuti pelepasan satu saluran dari saluran ganda.

##### **2. Single Pole Auto Reclosing Time**

Kasus ini dilakukan analisa kestabilan transien dengan kondisi beban *peak* dan beban *light* masing-masing satu kali percobaan. Percobaan dilakukan pada bus yang memiliki hubung singkat 1 fasa ke tanah paling besar dan dicari waktu pemutusan saluran dan waktu untuk penutupan kembali. Apabila kasus terdapat pada saluran ganda, maka satu saluran yang terkena gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah diikuti pelepasan satu saluran yang terkena gangguan dan dilakukan penutupan saluran kembali

##### **3. Pelepasan Generator**

Kasus ini dilakukan percobaan melepas satu buah generator yang paling besar dalam sistem interkoneksi Jamali, sedangkan generator yang lain tetap aktif dan dianalisa kestabilan transiennya. Percobaan dilakukan dengan kondisi beban *peak* dan beban *light* dengan masing-masing satu kali percobaan. Dengan

data yang dimiliki generator yang terbesar adalah PLTU Bojanegara1 yang memiliki kapasitas 1000 MW dengan pembangkitan 675 MW dan lokasinya didekat pusat beban.

4. **Pelepasan Satu Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Gangguan**  
Kasus ini dilakukan percobaan dengan melepas satu saluran dari saluran ganda dan dianalisa kestabilan transiennya. Percobaan ini dilakukan pada kondisi beban *peak* dan beban *light* masing masing satu kali percobaan. Percobaan dilakukan pada saluran ganda yang memiliki aliran daya yang terbesar.
5. **Pelepasan Dua Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Gangguan**  
Kasus ini dilakukan percobaan dengan melepas dua saluran dari saluran ganda dan dianalisa kestabilan transiennya. Percobaan ini dilakukan pada kondisi beban *peak* dan beban *light* masing masing satu kali percobaan. Percobaan dilakukan pada saluran yang memiliki aliran daya yang terbesar, dengan melakukan simulasi aliran daya.

Untuk memudahkan mengetahui studi kasus yang akan dianalisa pada Tugas Akhir ini dapat dijelaskan dengan Tabel 4.1 studi Kasus Kestabilan Transien berikut ini:

**Tabel 4.1** Studi Kasus Kestabilan Transien

Kasus 1	Kondisi	Saluran	CCT, CB <i>Open</i> (detik)			
			Sudut Rotor		Frekuensi	
			Stabil	Tidak Stabil	Aman	Tidak Aman
CCT	Peak	Gandul-Lekong	0.543	0.544	0.252	0.253
		Muara Tawar-Bekasi	0.624	0.625	0.297	0.298
		Depok-Bogor	0.585	0.586	0.262	0.263
	Light	Gandul-Lekong	0.509	0.51	0.308	0.309
		Muara Tawar-Bekasi	1.016	1.017	0.417	0.418
		Depok-Bogor	0.556	0.557	0.327	0.328

Kasus 2	Kondisi	Saluran	CB <i>Open</i> (detik)	CB <i>Reclose</i> (detik)
<i>Auto Recloser</i>	Peak	Muara Tawar-Bekasi	0.2	0.9
	Light		0.2	0.9
Kasus 3	Kondisi	Pembangkit	Kapasitas (MW)	Pembangkitan (MW)
<i>Gen Out</i>	Peak	Generator Bojanegara 1	1000	675
	Light			675
Kasus 4	Kondisi	Saluran	Aliran Daya (MW)	
Trip 1 Saluran	Peak	Cikupa-Balaraja	2226.154	
	Light		933.392	
Kasus 5	Kondisi	Saluran	Aliran Daya (MW)	
Trip 2 Saluran	Peak	Cikupa-Balaraja	2226.154	
	Light		933.392	

Untuk menentukan lokasi pada studi kasus maka dibutuhkan data-data hasil simulasi untuk mengetahui arus hubung singkat pada bus dan aliran daya yang lewat pada saluran. Data-data hasil simulasi sebagai berikut:

**Tabel 4.2** Hubung singkat 3 fasa pada kondisi beban *peak*

Bus	Isc 3 fasa (kA)
Gandul	95.892
Muara Tawar	94.406
Depok	94.343
Cibinong	89.613
Bekasi	83.772
Priok	82.490
Kembang	82.223
Balaraja	81.951
Durikosambi	80.873
Tambun	79.332

**Tabel 4.3** Hubung singkat 3 fasa pada kondisi beban *light*

BUS	Isc 3 fasa (kA)
Gandul	67.005
Depok	66.818
Muara Tawar	66.461
Cibinong	65.049
Kembang	63.331
Durikosambi	62.182
Balaraja	61.611
Priok	61.449
Bekasi	60.838
Muara Karang	59.551

**Tabel 4.4** Hubung singkat 1 fasa ke tanah pada kondisi beban *peak*

Bus	Isc 1 fasa ketanah (kA)
Muara Tawar	59.581
Suralaya	57.611
Suralaya Baru	57.241
Banten	56.484
Bojanegara	50.712

**Tabel 4.5** Hubung singkat 1 fasa ke tanah pada kondisi beban *light*

Bus	Isc 1 fasa ketanah (kA)
Muara Tawar	43.089
Suralaya Baru	43.045
Suralaya	42.932
Banten	42.682
Balaraja	39.344

**Tabel 4.6** Aliran daya yang dilewati saluran pada kondisi beban *peak*

Saluran	Aliran Daya (MW)
Cikupa-Balaraja	2226.154
Cikupa –Lekong	1633
Kesugihan – Adipala	1467.58
Bojanegara - Balaraja	1391.431
Tanara- Balaraja	1347.648

**Tabel 4.7** Aliran daya yang dilewati saluran pada kondisi beban *light*

Saluran	Aliran Daya (MW)
Cikupa - Balaraja	933.392
Kesugihan – Adipala	733.984
Bojanegara - Balaraja	700.703
Deltamas-Indramayu	674.659
Tanara - Balaraja	673.961

#### **4.2 Penentuan Waktu *Critical Clearing Time***

Pada kasus ini dicari waktu pemutusan kritis atau *critical clearing time* yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat 3 fasa dan percobaan dilakukan pada bus dengan nilai arus hubung singkat 3 fasa yang terbesar. Dalam tugas akhir ini untuk menemukan waktu pemutusan kritis untuk menghilangkan gangguan menggunakan metode *time domain simulation* dengan melihat sudut rotor terhadap domain waktu, sudut rotor dikatakan stabil apabila pada keadaan *steady state* nilainya berada dibawah batas kestabilan  $180^\circ$  dan sudut rotor dikatakan tidak stabil apabila pada keadaan *steady state* nilainya diatas batas kestabilan  $180^\circ$ . Pada perubahan frekuensi juga dilihat berdasarkan nilai *abnormal* frekuensi sesuai standar IEEE Std C37.106-2003, frekuensi dalam range aman apabila pada keadaan transien masih didalam range 47 – 51.417 Hz dan pada keadaan *continuous operating range* masih didalam range 49.583 – 50.417 Hz.

### 4.2.1 Pada saat Beban *Peak*

Dari data hasil simulasi untuk mengetahui bus dengan arus hubung singkat 3 fasa terbesar, digunakan tiga bus dengan hubung singkat 3 fasa terbesar yang akan dianalisa kestabilan transiennya untuk mencari waktu pemutusan kritis atau *critical clearing time* pada saat kondisi beban *peak*, yaitu bus Gandul, bus Muara Tawar, dan bus Depok. Berikut ini adalah Tabel 4.8 hasil simulasi *critical clearing time* yang telah didapatkan yaitu:

**Tabel 4.8** Hasil simulasi CTT kondisi beban *peak*

Saluran	CCT, CB <i>open</i> (detik)			
	Sudut Rotor		Frekuensi	
	Stabil	Tidak Stabil	Aman	Tidak Aman
Gandul-Lekong	0.543	0.544	0.252	0.253
Muara Tawar-Bekasi	0.624	0.625	0.297	0.298
Depok-Bogor	0.585	0.586	0.262	0.263

Pada saluran Gandul-Lekong dengan hubung singkat 3 fasa didekat bus Gandul dapat ditemukan pemutusan kritis untuk sudut rotor stabil dan tidak stabil yaitu 0.543-0.544 detik, sedangkan pemutusan kritis untuk frekuensi dalam range aman dan tidak aman yaitu 0.252-0.253 detik.

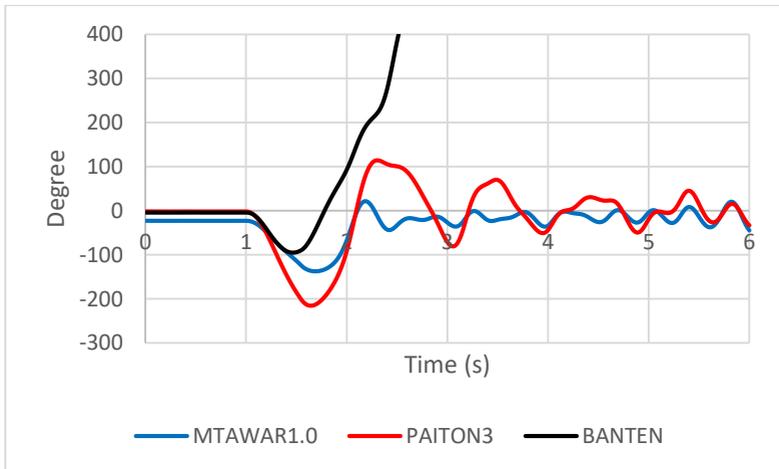
Pada saluran Muara Tawar-Bekasi dengan hubung singkat 3 fasa didekat bus Muara Tawar dapat ditemukan pemutusan kritis untuk sudut rotor stabil dan tidak stabil yaitu 0.624-0.625detik, sedangkan pemutusan kritis untuk frekuensi dalam range aman dan tidak aman yaitu 0.297-0.298 detik.

Pada saluran Depok-Bogor dengan hubung singkat 3 fasa didekat bus Depok dapat ditemukan pemutusan kritis untuk sudut rotor stabil dan tidak stabil yaitu 0.585-0.586 detik, sedangkan pemutusan kritis untuk frekuensi dalam range aman dan tidak aman yaitu 0.262-0.263 detik.

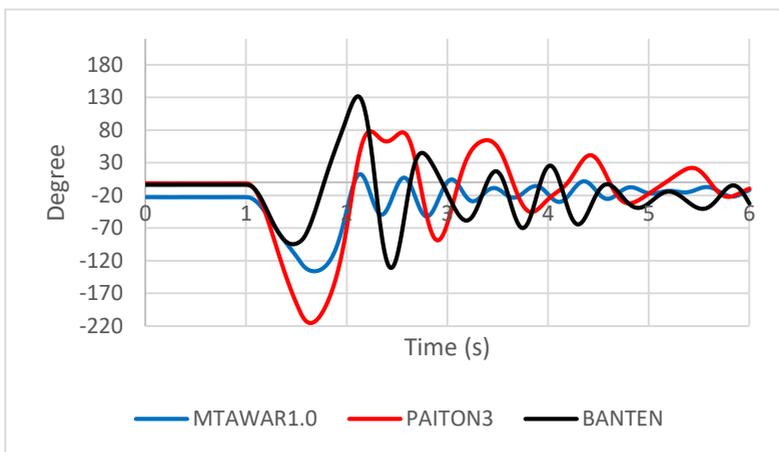
#### 4.2.1.1 Saluran Gandul – Lekong (SC 3 Fasa di dekat Bus Gandul)

##### a. Menemukan waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil

Pada studi kasus ini dicari waktu pemutusan kritis saluran untuk menghilangkan gangguan hubung singkat 3 fasa dengan mencari ketika CB *open* saat sudut rotor stabil dan sudut rotor tidak stabil.



**Gambar 4.1** Sudut rotor tidak stabil kritis, CB *Open* 0.544 detik

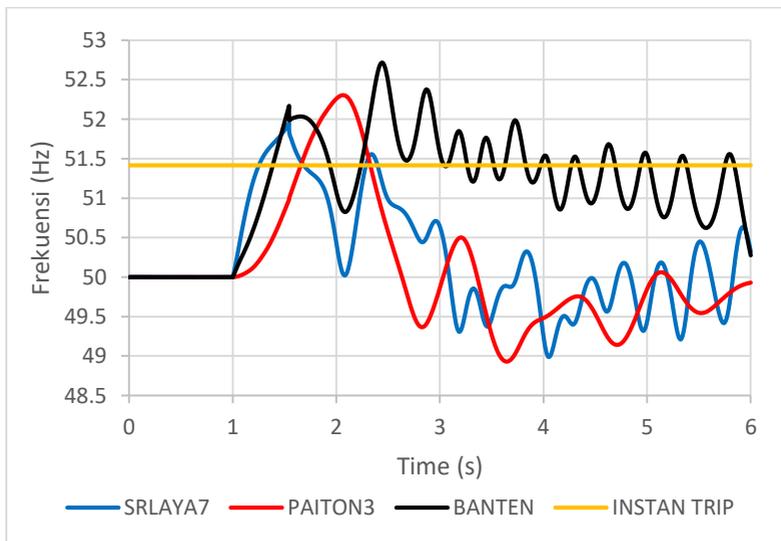


**Gambar 4.2** Sudut rotor stabil kritis, CB *Open* 0.543 detik

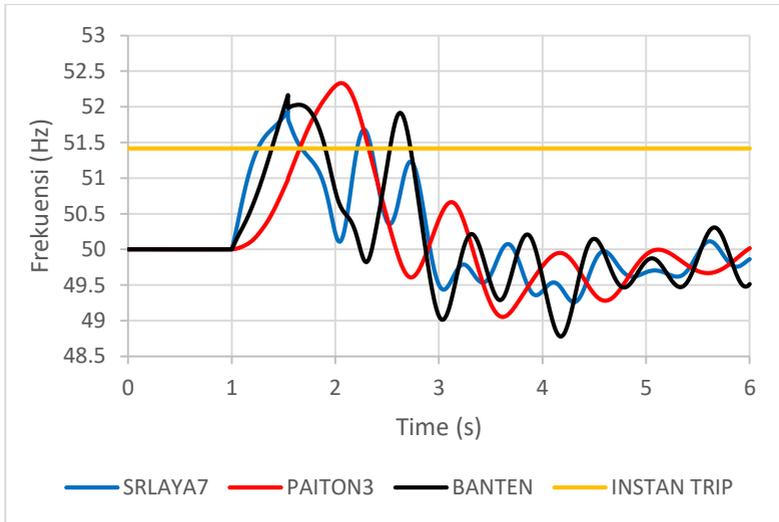
Dapat dilihat pada Gambar 4.1 sudut rotor generator mengalami osilasi, tetapi pada sudut rotor generator Muara Tawar1 terus meningkat yang melebihi batas kestabilan  $180^\circ$ , sehingga generator akan terus terjadi slipping pole dan lepas sinkron dengan sistem. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor tidak stabil.

Dapat dilihat pada Gambar 4.2 sudut rotor semua generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah sudut rotor generator Paiton3 dengan minimal  $-215.27^\circ$  dan maksimal  $77.76^\circ$  tetapi dapat berisolasi menurun dibawah batas kestabilan  $180^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $-9.74^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.

Setelah melihat respon dari sudut rotor maka yang selanjutnya dilihat adalah respon semua frekuensi dari generator apakah masih dalam range yang aman sesuai dari standar *abnormal* frekuensi yaitu dengan batas maksimal frekuensi pada saat gangguan tidak melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Apabila frekuensi melebihi dari batas frekuensi yang dilarang maka akan menyebabkan adanya potensi keretakan bilah turbin dari generator.



**Gambar 4.3** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.544 detik



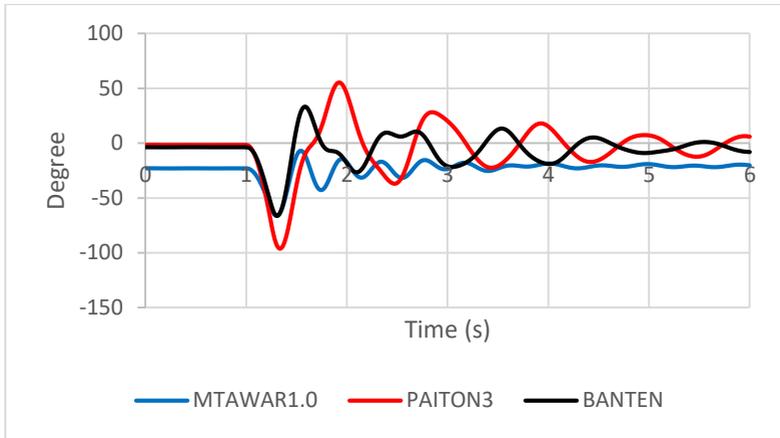
**Gambar 4.4** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.543 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.3 semua frekuensi pada generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Banten mencapai 52.716 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi berada pada range yang tidak aman.

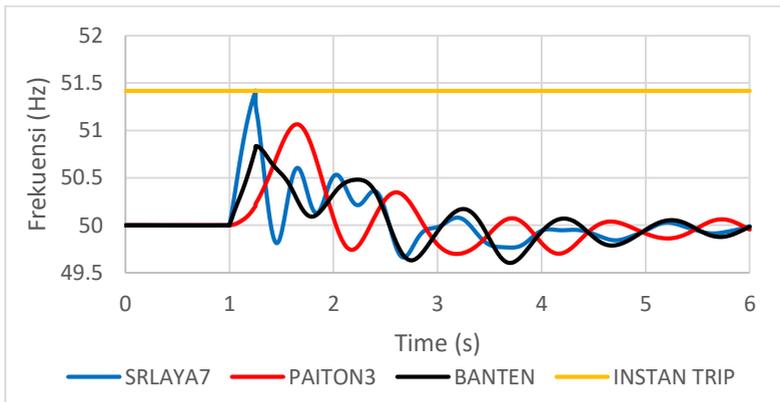
Dapat dilihat pada Gambar 4.4 semua frekuensi generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Paiton3 mencapai 52.33 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga frekuensi berada pada range yang tidak aman, walaupun sudut rotor sudah pada keadaan stabil. Sehingga perlu dicari waktu CB *Open* dengan nilai frekuensi pada nilai yang aman.

#### **b. Menemukan waktu pemutusan kritis frekuensi pada range aman**

Dapat dilihat pada Gambar 4.5 semua sudut rotor generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah sudut rotor generator Paiton3 dengan minimal  $-96.35^\circ$  dan maksimal  $55.19^\circ$  tetapi masih dapat menurun hingga dibawah  $90^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $5.89^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.5** Sudut rotor stabil, CB *Open* 0.252 detik



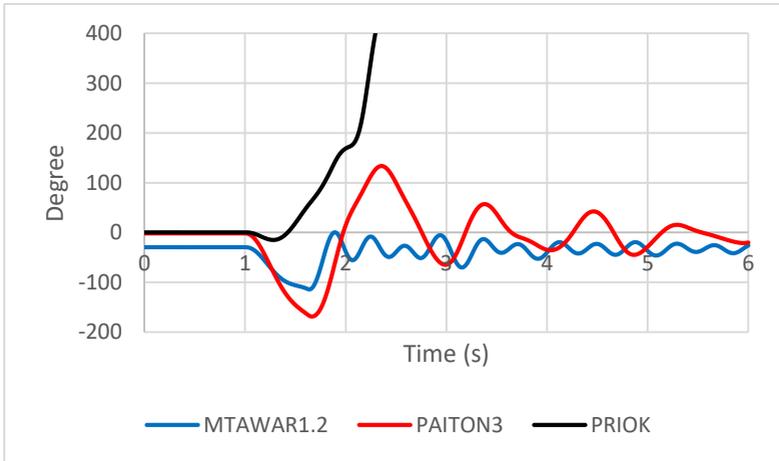
**Gambar 4.6** Frekuensi range aman, CB *Open* 0.252 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.6 frekuensi pada generator Suralaya7 mengalami isolasi mencapai 51.415 Hz yang nilainya kritis dibawah batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Nilai frekuensi mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan 49.989 Hz dan masih dalam batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz. Dapat disimpulkan pada CB *Open* 0.252s sudut rotor stabil dan frekuensi pada range aman.

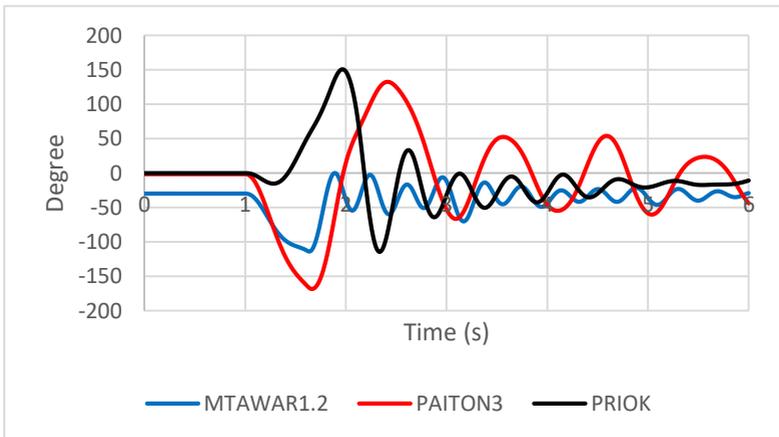
#### 4.2.1.2 Saluran Muara Tawar – Bekasi (SC 3 Fasa di dekat Bus Muara Tawar)

##### a. Menemukan waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil

Pada studi kasus ini dicari waktu pemutusan kritis saluran untuk menghilangkan gangguan hubung singkat 3 fasa dengan mencari ketika CB *open* saat sudut rotor stabil dan sudut rotor tidak stabil.



**Gambar 4.7** Sudut rotor tidak stabil kritis, CB *Open* 0.625 detik

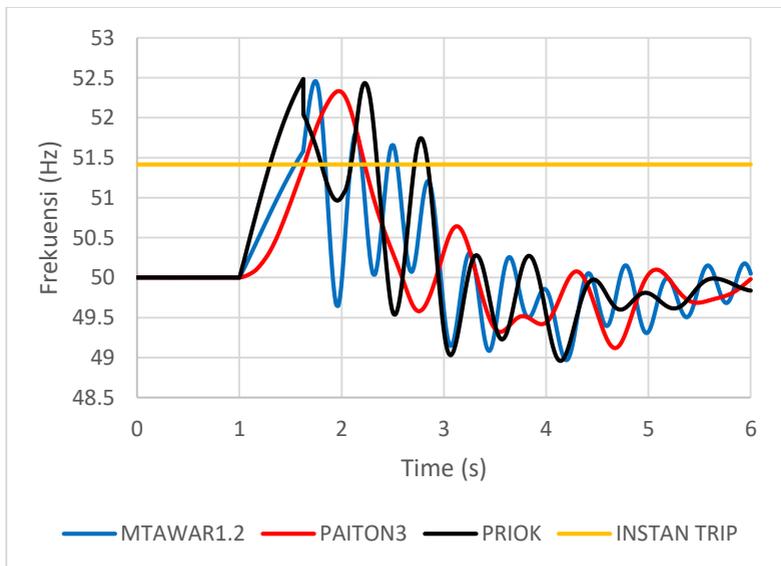


**Gambar 4.8** Sudut rotor stabil kritis, CB *Open* 0.624 detik

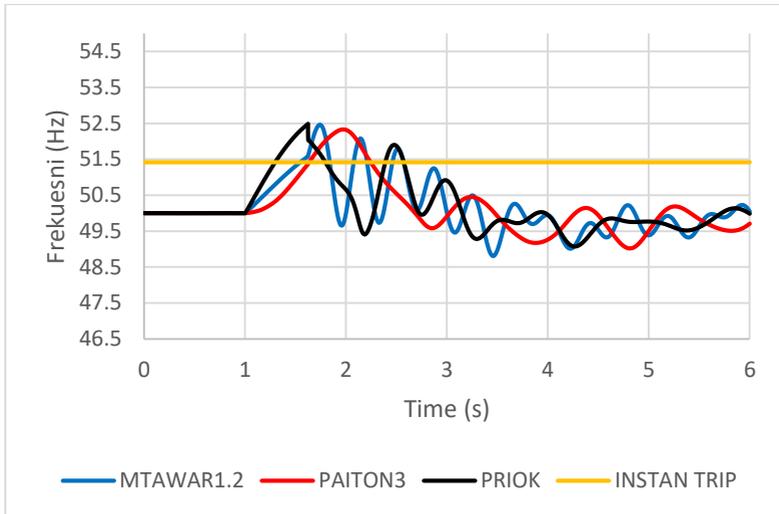
Dapat dilihat pada Gambar 4.7 sudut rotor generator mengalami osilasi, tetapi pada sudut rotor generator Priok terus meningkat melewati batas kestabilan  $180^\circ$ , sehingga generator akan terus terjadi slipping pole dan lepas sinkron dengan sistem. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor tidak stabil.

Dapat dilihat pada Gambar 4.8 sudut rotor semua generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah generator Paiton3 dengan minimal  $-168.51^\circ$  dan maksimal  $132.27^\circ$  tetapi dapat berisolasi menurun dibawah  $180^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $-44.1^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.

Setelah melihat respon dari sudut rotor maka yang selanjutnya dilihat adalah respon semua frekuensi dari generator apakah masih dalam range yang aman sesuai dari standar *abnormal* frekuensi yaitu dengan batas maksimal frekuensi pada saat gangguan tidak melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Apabila frekuensi melebihi dari batas frekuensi yang dilarang maka akan menyebabkan adanya potensi keretakan bilah turbin dari generator.



**Gambar 4.9** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.625 detik



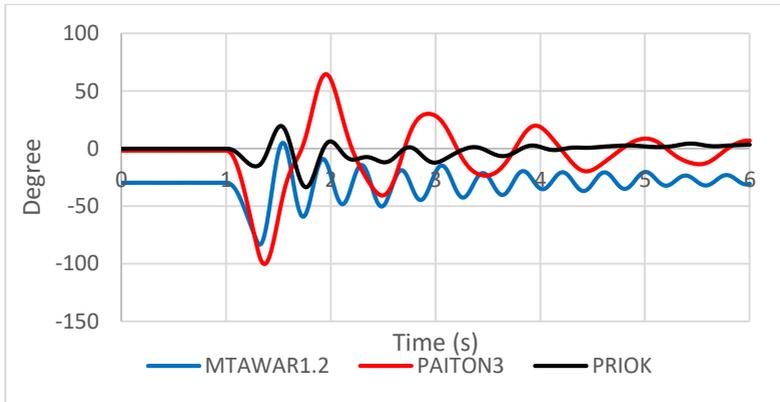
**Gambar 4.10** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.624 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.9 semua frekuensi pada generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Priok mencapai 52.485 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi berada pada range yang tidak aman.

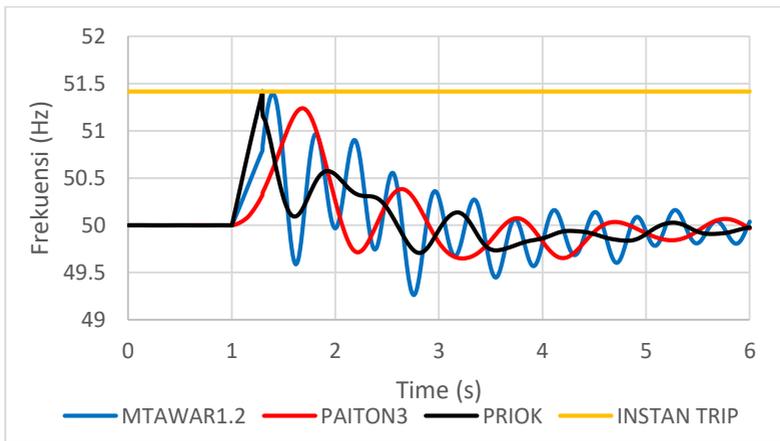
Dapat dilihat pada Gambar 4.10 semua frekuensi generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Muara Tawar1.2 mencapai 52.458 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga frekuensi berada pada range yang tidak aman, walaupun sudut rotor sudah pada keadaan stabil. Sehingga perlu dicari waktu CB *Open* dengan nilai frekuensi pada nilai yang aman.

#### **b. Menemukan waktu pemutusan kritis frekuensi pada range aman**

Dapat dilihat pada Gambar 4.11 semua sudut rotor generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah sudut rotor generator Paiton3 dengan minimal  $-100.17^\circ$  dan maksimal  $64.68^\circ$  tetapi masih dapat menurun hingga dibawah  $90^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $6.99^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.11** Sudut rotor stabil, CB *Open* 0.297 detik



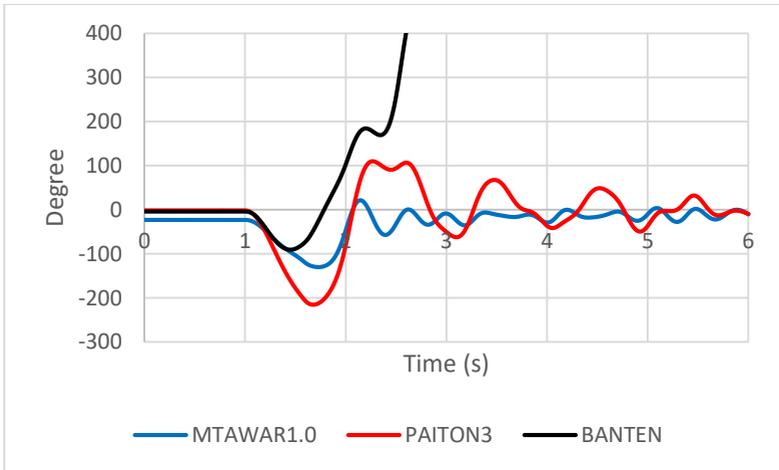
**Gambar 4.12** Frekuensi range aman, CB *Open* 0.297 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.12 frekuensi pada generator Priok mengalami isolasi mencapai 51.412 Hz yang nilainya kritis dibawah batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Nilai frekuensi mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan 49.977 Hz dan masih dalam batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz. Dapat disimpulkan pada CB *Open* 0.297s sudut rotor stabil dan frekuensi pada range aman.

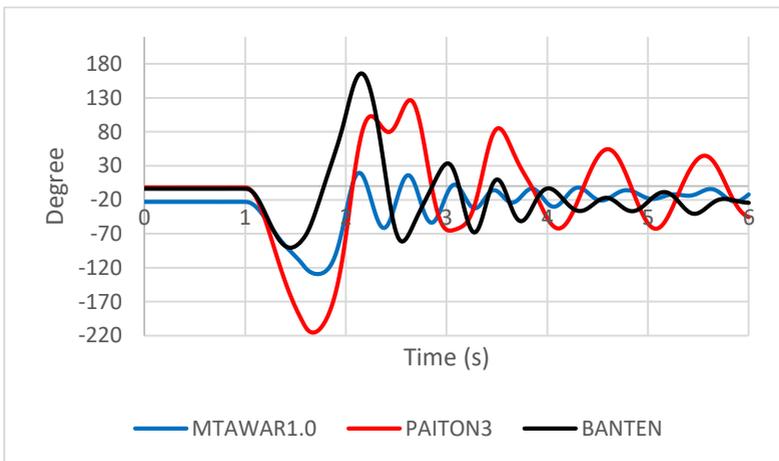
### 4.2.1.3 Saluran Depok – Bogor (SC 3 Fasa di dekat Bus Depok)

#### a. Menemukan waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil

Pada studi kasus ini dicari waktu pemutusan kritis saluran untuk menghilangkan gangguan hubung singkat 3 fasa dengan mencari ketika CB open saat sudut rotor stabil dan sudut rotor tidak stabil.



**Gambar 4.13** Sudut rotor tidak stabil kritis, CB *Open* 0.586 detik

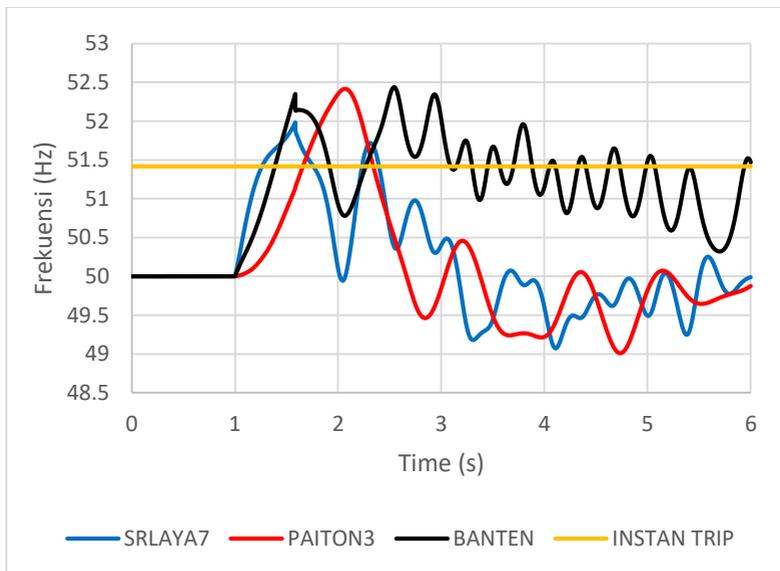


**Gambar 4.14** Sudut rotor stabil kritis, CB *Open* 0.585 detik

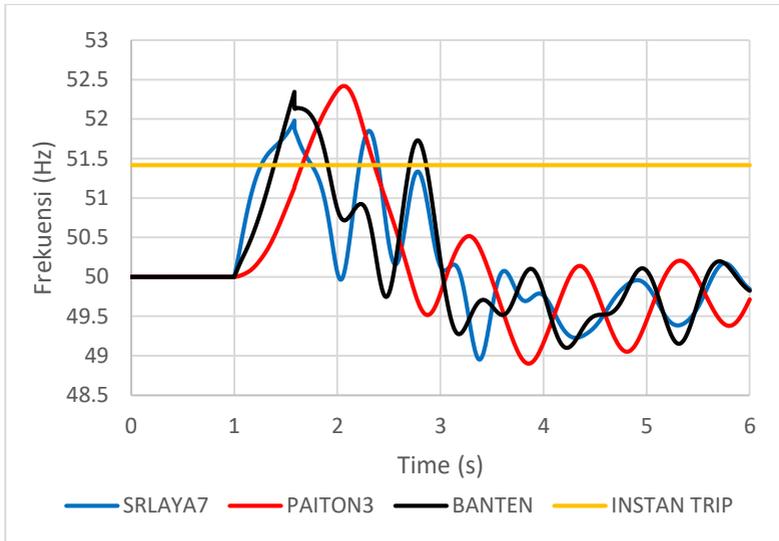
Dapat dilihat pada Gambar 4.13 sudut rotor generator mengalami osilasi, tetapi pada sudut rotor generator Banten terus meningkat yang melebihi batas kestabilan  $180^\circ$ , sehingga generator akan terus terjadi slipping pole dan lepas sinkron dengan sistem. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor tidak stabil.

Dapat dilihat pada Gambar 4.14 sudut rotor semua generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah sudut rotor generator Paiton3 dengan minimal  $-215.18^\circ$  dan maksimal  $126.49^\circ$  tetapi dapat berisolasi menurun dibawah  $180^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $-45.3^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.

Setelah melihat respon dari sudut rotor maka yang selanjutnya dilihat adalah respon semua frekuensi dari generator apakah masih dalam range yang aman sesuai dari standar abnormal frekuensi yaitu dengan batas maksimal frekuensi pada saat gangguan tidak melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Apabila frekuensi melebihi dari batas frekuensi yang dilarang maka akan menyebabkan adanya potensi keretakan bilah turbin dari generator.



**Gambar 4.15** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.586 detik



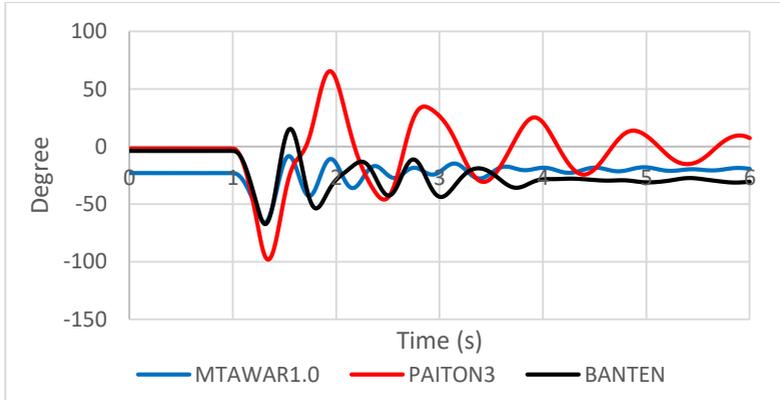
**Gambar 4.16** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.585 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.15 semua frekuensi pada generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Banten mencapai 52.437 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi berada pada range yang tidak aman.

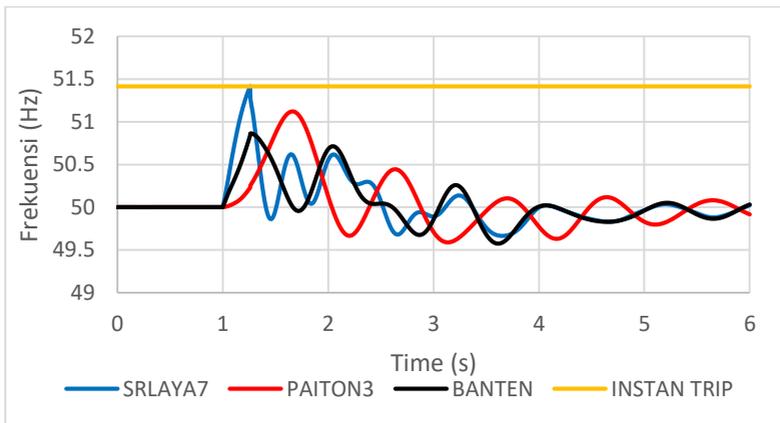
Dapat dilihat pada Gambar 4.16 semua frekuensi generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Paiton3 mencapai 52.419 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga frekuensi berada pada range yang tidak aman, walaupun sudut rotor sudah pada keadaan stabil. Sehingga perlu dicari waktu CB *Open* dengan nilai frekuensi pada nilai yang aman.

**b. Menemukan waktu pemutusan kritis frekuensi pada range aman**

Dapat dilihat pada Gambar 4.17 semua sudut rotor generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah sudut rotor generator Paiton3 dengan minimal  $-98.29^\circ$  dan maksimal  $65.54^\circ$  tetapi masih dapat menurun hingga dibawah  $90^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $7.37^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.17** Sudut rotor stabil, CB *Open* 0.262 detik



**Gambar 4.18** Frekuensi range aman, CB *Open* 0.262 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.18 frekuensi pada generator Suralaya7 mengalami isolasi mencapai 51.415 Hz yang nilainya kritis dibawah batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Nilai frekuensi mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan 50.022 Hz dan masih dalam batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz. Dapat disimpulkan pada CB *Open* 0.262s sudut rotor stabil dan frekuensi pada range aman.

#### 4.2.2 Pada saat Beban *light*

Dari data hasil simulasi untuk mengetahui bus dengan arus hubung singkat 3 fasa terbesar, digunakan tiga bus dengan hubung singkat 3 fasa terbesar yang akan dianalisa kestabilan transiennya untuk mencari waktu pemutusan kritis atau *critical clearing time* pada saat kondisi beban *light*, yaitu bus Gandul, bus Depok, dan bus Muara Tawar. Berikut ini adalah Tabel 4.9 hasil simulasi *critical clearing time* yang telah didapatkan yaitu:

**Tabel 4.9** Hasil simulasi CTT kondisi beban *light*

Saluran	CCT, CB <i>open</i> (detik)			
	Sudut rotor		Frekuensi	
	Stabil	Tidak stabil	Aman	Tidak Aman
Gandul-Lekong	0.509	0.510	0.308	0.309
Depok-Bogor	0.556	0.557	0.327	0.328
Muara Tawar-Bekasi	1.016	1.017	0.417	0.418

Pada saluran Gandul-Lekong dengan hubung singkat 3 fasa didekat bus Gandul dapat ditemukan pemutusan kritis untuk sudut rotor stabil dan tidak stabil yaitu 0.509-0.510 detik, sedangkan pemutusan kritis untuk frekuensi dalam range aman dan tidak aman yaitu 0.308-0.309 detik.

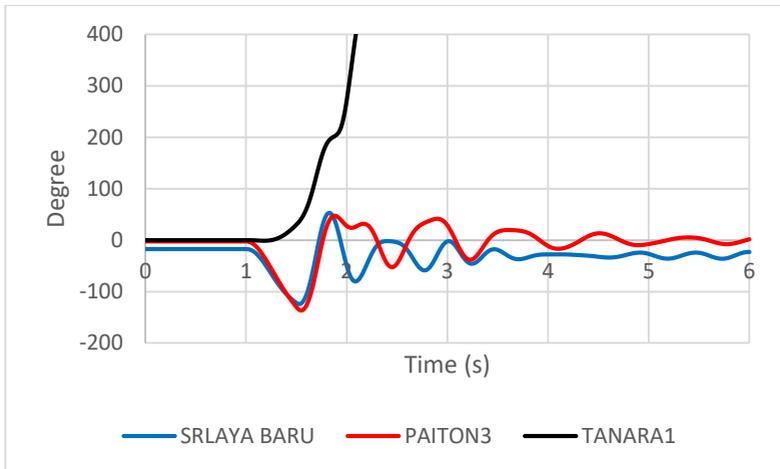
Pada saluran Depok-Bogor dengan hubung singkat 3 fasa didekat bus Depok dapat ditemukan pemutusan kritis untuk sudut rotor stabil dan tidak stabil yaitu 0.556-0.557 detik, sedangkan pemutusan kritis untuk frekuensi dalam range aman dan tidak aman yaitu 0.327-0.328 detik.

Pada saluran Muara Tawar-Bekasi dengan hubung singkat 3 fasa didekat bus Muara Tawar dapat ditemukan pemutusan kritis untuk sudut rotor stabil dan tidak stabil yaitu 1.016-1.017 detik, sedangkan pemutusan kritis untuk frekuensi dalam range aman dan tidak aman yaitu 0.417-0.418 detik.

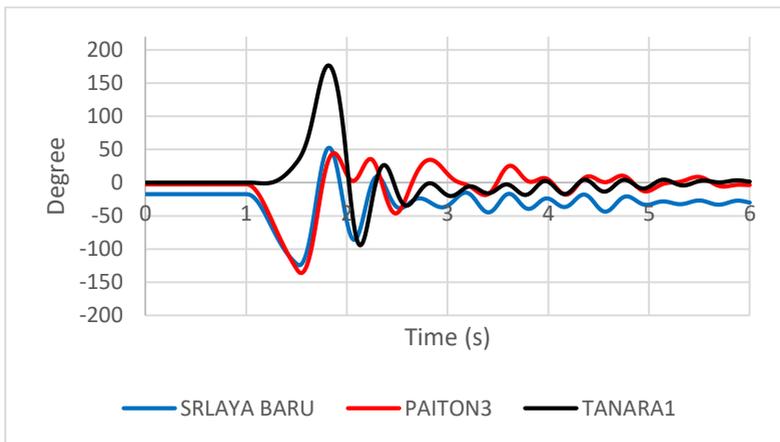
#### 4.2.2.1 Saluran Gandul – Lekong (SC 3 Fasa di dekat Bus Gandul)

##### a. Menemukan waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil

Pada studi kasus ini dicari waktu pemutusan kritis saluran untuk menghilangkan gangguan hubung singkat 3 fasa dengan mencari ketika CB open saat sudut rotor stabil dan sudut rotor tidak stabil.



**Gambar 4.19** Sudut rotor tidak stabil kritis, CB *Open* 0.510 detik

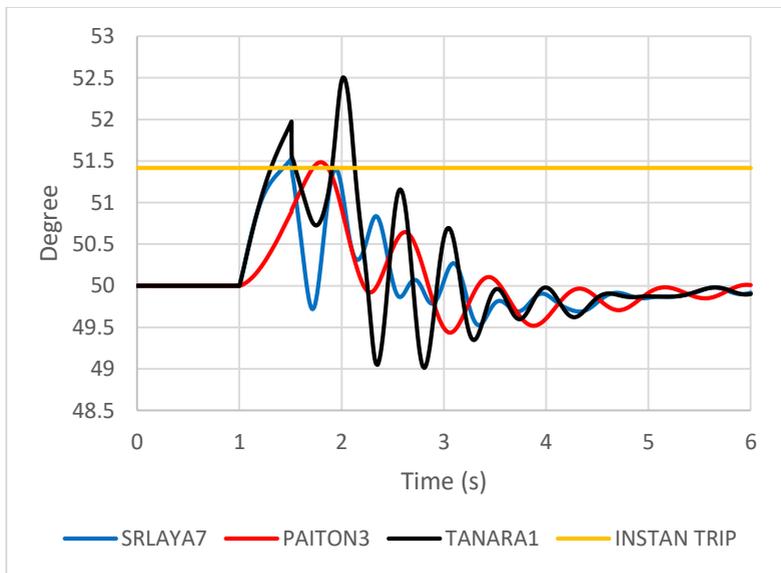


**Gambar 4.20** Sudut rotor stabil kritis, CB *Open* 0.509 detik

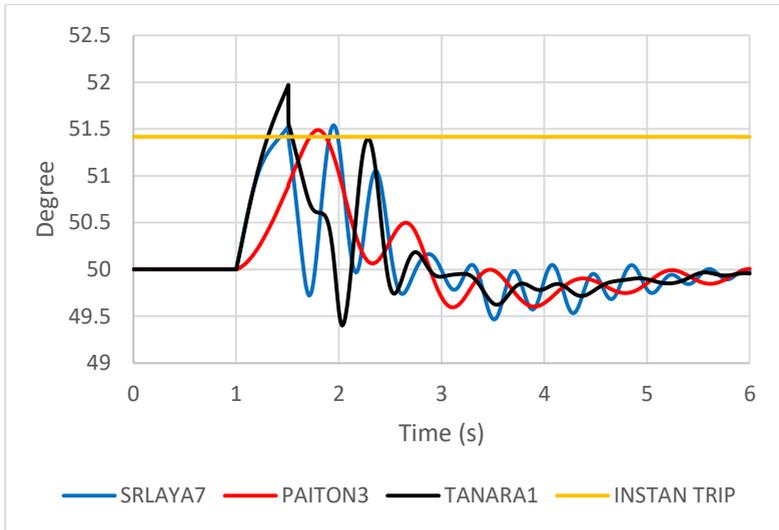
Dapat dilihat pada Gambar 4.19 sudut rotor generator mengalami osilasi, tetapi pada sudut rotor generator Tanara1 terus meningkat melebihi batas kestabilan  $180^\circ$ , sehingga generator akan terus terjadi slipping pole dan lepas sinkron dengan sistem. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor tidak stabil.

Dapat dilihat pada Gambar 4.20 sudut rotor semua generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah generator Tanara1 dengan minimal  $-94.07^\circ$  dan maksimal  $176.62^\circ$  tetapi dapat berisolasi menurun dibawah  $180^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $-1.75^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.

Setelah melihat respon dari sudut rotor maka yang selanjutnya dilihat adalah respon semua frekuensi dari generator apakah masih dalam range yang aman sesuai dari standar abnormal frekuensi yaitu dengan batas maksimal frekuensi pada saat gangguan tidak melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Apabila frekuensi melebihi dari batas frekuensi yang dilarang maka akan menyebabkan adanya potensi keretakan bilah turbin dari generator.



**Gambar 4.21** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.510 detik



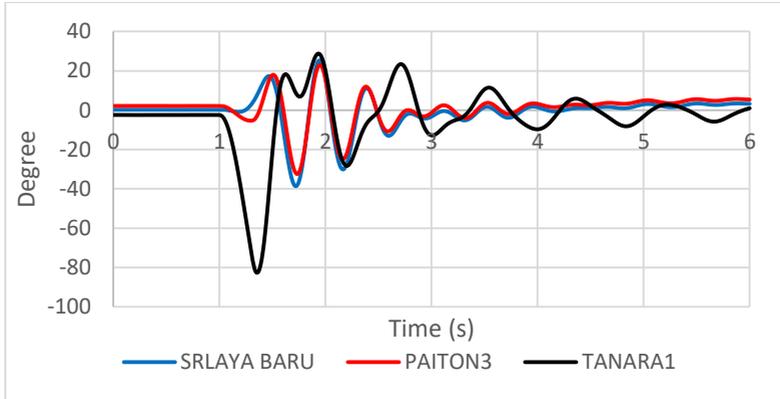
**Gambar 4.22** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.509 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.21 semua frekuensi pada generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Tanara1 mencapai 52.5 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi berada pada range yang tidak aman.

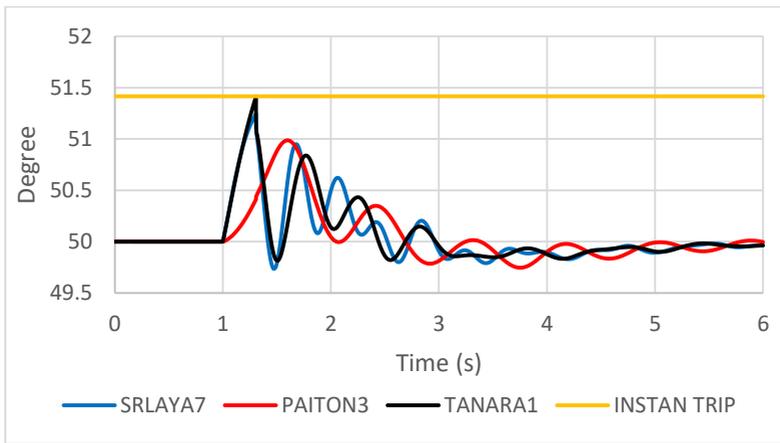
Dapat dilihat pada Gambar 4.22 semua frekuensi generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Tanara1 mencapai 51.97 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga frekuensi berada pada range yang tidak aman, walaupun sudut rotor sudah pada keadaan stabil. Sehingga perlu dicari waktu CB *Open* dengan nilai frekuensi pada nilai yang aman.

#### **b. Menemukan waktu pemutusan kritis frekuensi pada range aman**

Dapat dilihat pada Gambar 4.23 semua sudut rotor generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah sudut rotor generator Tanara1 dengan minimal  $-82.59^\circ$  dan maksimal  $28.75^\circ$  tetapi nilainya sudah dibawah  $90^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $1^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.23** Sudut rotor stabil, CB *Open* 0.308 detik



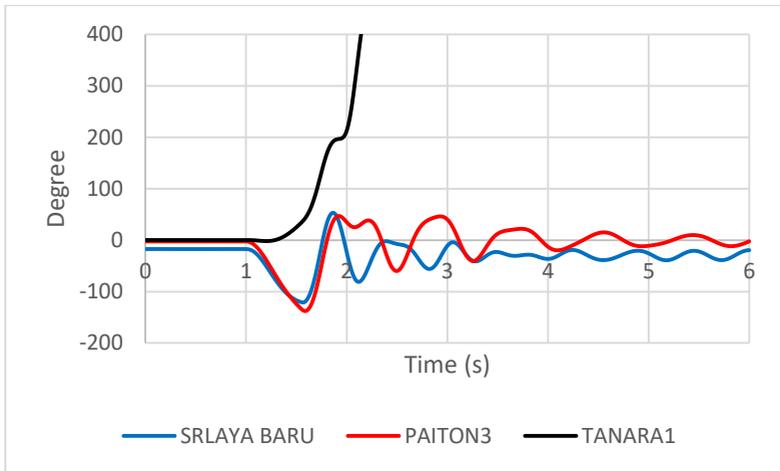
**Gambar 4.24** Frekuensi range aman, CB *Open* 0.308 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.24 frekuensi pada generator Tanara1 mengalami isolasi mencapai 51.415 Hz yang nilainya kritis dibawah batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Nilai frekuensi mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan 49.963 Hz dan masih dalam batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz. Dapat disimpulkan pada CB *Open* 0.303s sudut rotor stabil dan frekuensi pada range aman.

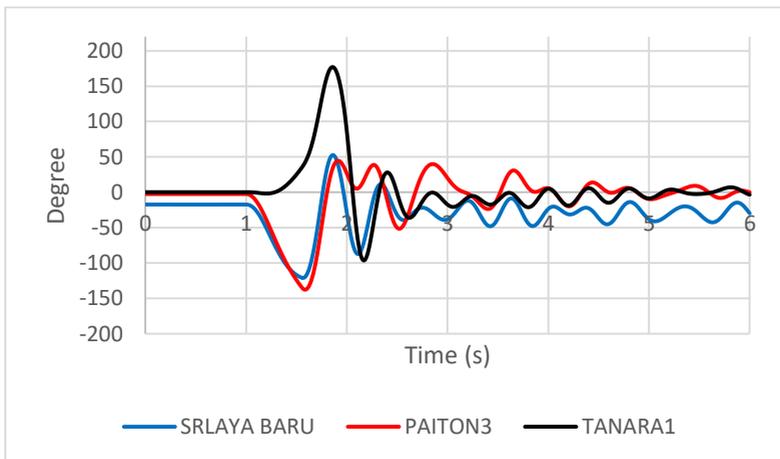
#### 4.2.2.2 Saluran Depok – Bogor (SC 3 Fasa di dekat Bus Depok)

##### a. Menemukan waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil

Pada studi kasus ini dicari waktu pemutusan kritis saluran untuk menghilangkan gangguan hubung singkat 3 fasa dengan mencari ketika CB open saat sudut rotor stabil dan sudut rotor tidak stabil.



**Gambar 4.25** Sudut rotor tidak stabil kritis, CB *Open* 0.557 detik

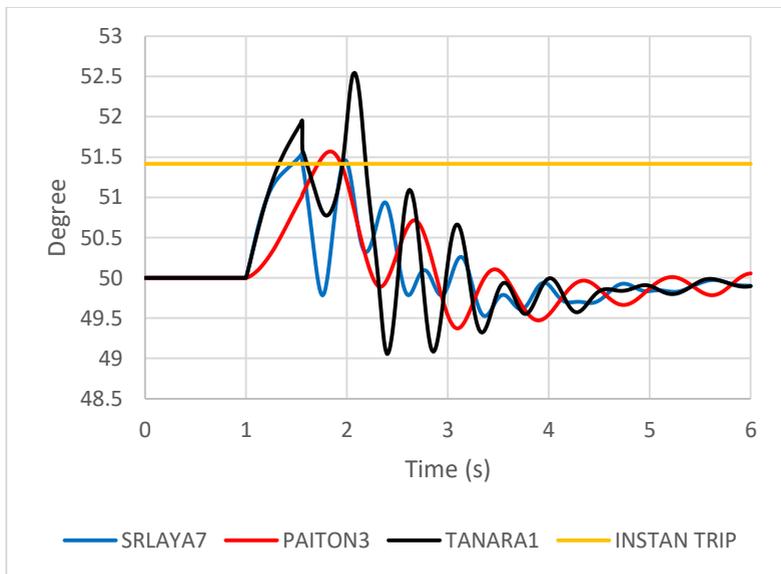


**Gambar 4.26** Sudut rotor stabil kritis, CB *Open* 0.556 detik

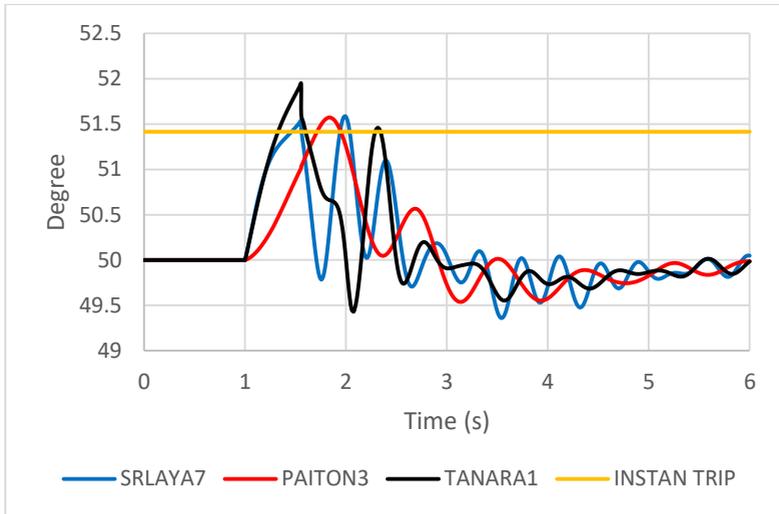
Dapat dilihat pada Gambar 4.25 sudut rotor generator mengalami osilasi, tetapi pada sudut rotor generator Tanara1 terus meningkat melewati batas kestabilan  $180^\circ$ , sehingga generator akan terus terjadi slipping pole dan lepas sinkron dengan sistem. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor tidak stabil.

Dapat dilihat pada Gambar 4.26 sudut rotor semua generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah generator Tanara1 dengan minimal  $-95.96^\circ$  dan maksimal  $177.09^\circ$  tetapi dapat berisolasi menurun dibawah  $180^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $-3.39^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.

Setelah melihat respon dari sudut rotor maka yang selanjutnya dilihat adalah respon semua frekuensi dari generator apakah masih dalam range yang aman sesuai dari standar abnormal frekuensi yaitu dengan batas maksimal frekuensi pada saat gangguan tidak melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Apabila frekuensi melebihi dari batas frekuensi yang dilarang maka akan menyebabkan adanya potensi keretakan bilah turbin dari generator.



**Gambar 4.27** Frekuensi range tidak aman, CB Open 0.557 detik



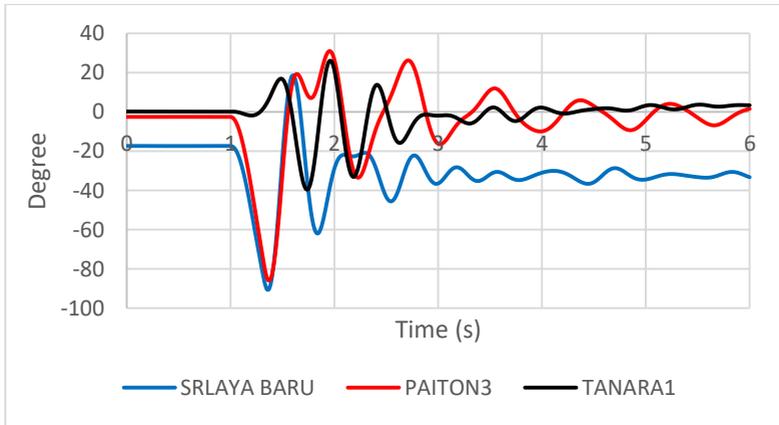
**Gambar 4.28** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 0.556 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.27 semua frekuensi pada generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Tanara1 mencapai 52.545 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi berada pada range yang tidak aman.

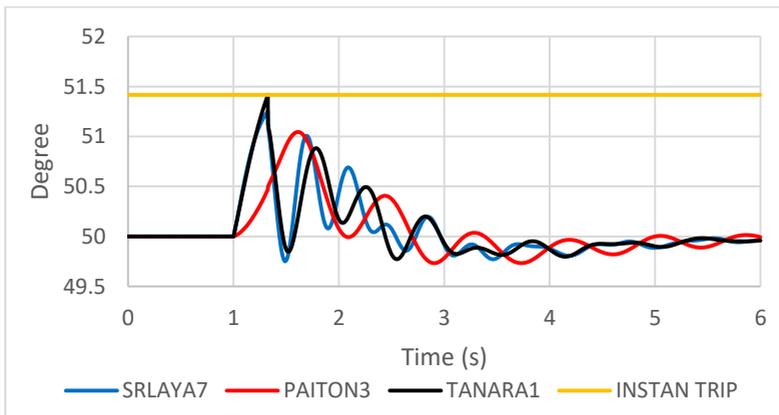
Dapat dilihat pada Gambar 4.28 semua frekuensi generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Tanara1 mencapai 51.948 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga frekuensi berada pada range yang tidak aman, walaupun sudut rotor sudah pada keadaan stabil. Sehingga perlu dicari waktu CB *Open* dengan nilai frekuensi pada nilai yang aman.

### **b. Menemukan waktu pemutusan kritis frekuensi pada range aman**

Dapat dilihat pada Gambar 4.29 semua sudut rotor generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah sudut rotor generator Suralaya Baru dengan minimal  $-90.4^\circ$  dan maksimal  $18.6^\circ$  tetapi masih dapat menurun hingga dibawah  $90^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $-33.21^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.29** Sudut rotor stabil, CB *Open* 0.327 detik



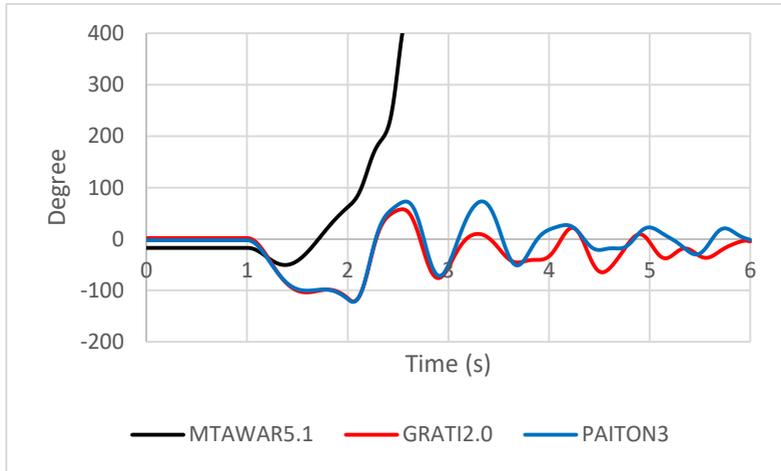
**Gambar 4.30** Frekuensi range aman, CB *Open* 0.327 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.30 frekuensi pada generator Tanara1 mengalami isolasi mencapai 51.415 Hz yang nilainya kritis dibawah batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Nilai frekuensi mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan 49.958 Hz dan masih dalam batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz. Dapat disimpulkan pada CB *Open* 0.303s sudut rotor stabil dan frekuensi pada range aman.

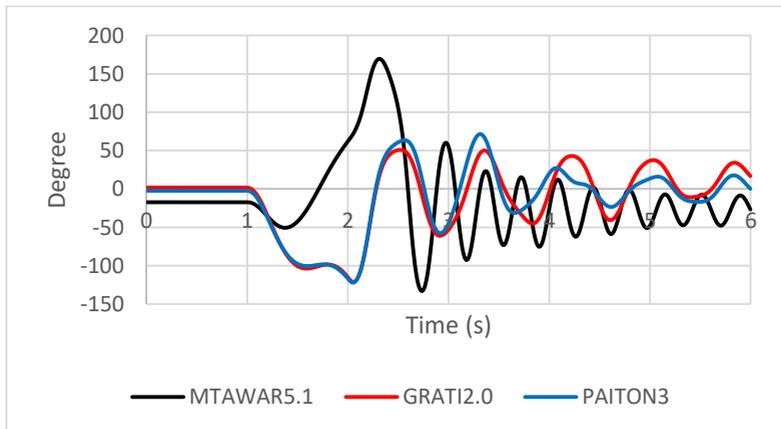
### 4.2.2.3 Saluran Muara Tawar – Bekasi (SC 3 Fasa di dekat Bus Muara Tawar)

#### a. Menemukan waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil

Pada studi kasus ini dicari waktu pemutusan kritis saluran untuk menghilangkan gangguan hubung singkat 3 fasa dengan mencari ketika CB open saat sudut rotor stabil dan sudut rotor tidak stabil.



**Gambar 4.31** Sudut rotor tidak stabil kritis, CB *Open* 1.017 detik

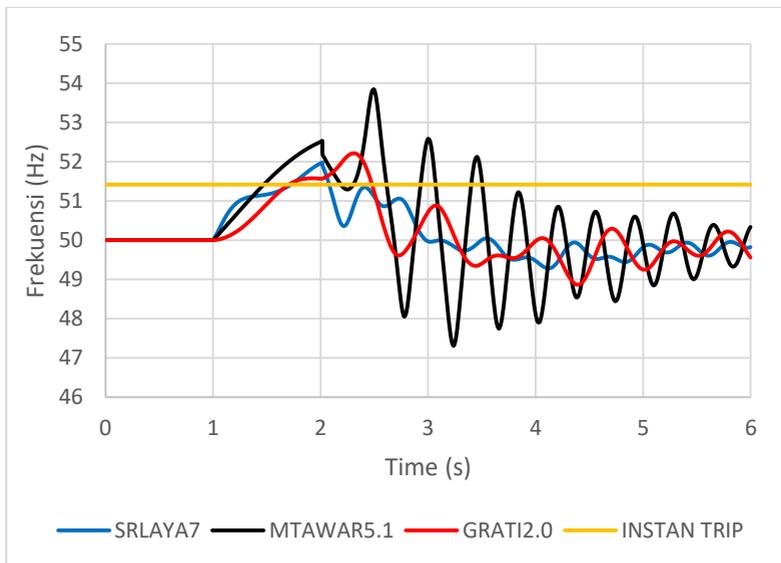


**Gambar 4.32** Sudut rotor stabil kritis, CB *Open* 1.016 detik

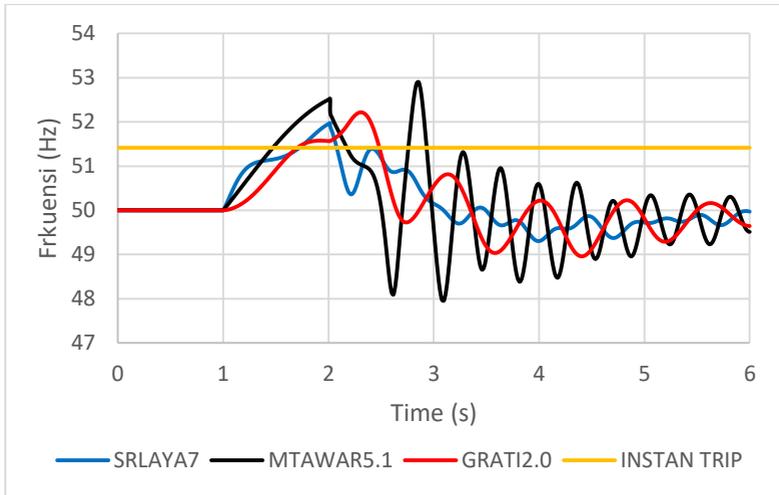
Dapat dilihat pada Gambar 4.31 sudut rotor generator mengalami osilasi, tetapi pada sudut rotor generator Muara Tawar5.1 terus meningkat melewati batas kestabilan  $180^\circ$ , sehingga generator akan terus terjadi slipping pole dan lepas sinkron dengan sistem. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor tidak stabil.

Dapat dilihat pada Gambar 4.32 sudut rotor semua generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah generator Tanaral dengan minimal  $-133.06^\circ$  dan maksimal  $169.58^\circ$  tetapi dapat berisolasi menurun dibawah  $180^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $-27.42^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.

Setelah melihat respon dari sudut rotor maka yang selanjutnya dilihat adalah respon semua frekuensi dari generator apakah masih dalam range yang aman sesuai dari standar abnormal frekuensi yaitu dengan batas maksimal frekuensi pada saat gangguan tidak melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Apabila frekuensi melebihi dari batas frekuensi yang dilarang maka akan menyebabkan adanya potensi keretakan bilah turbin dari generator.



**Gambar 4.33** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 1.017 detik



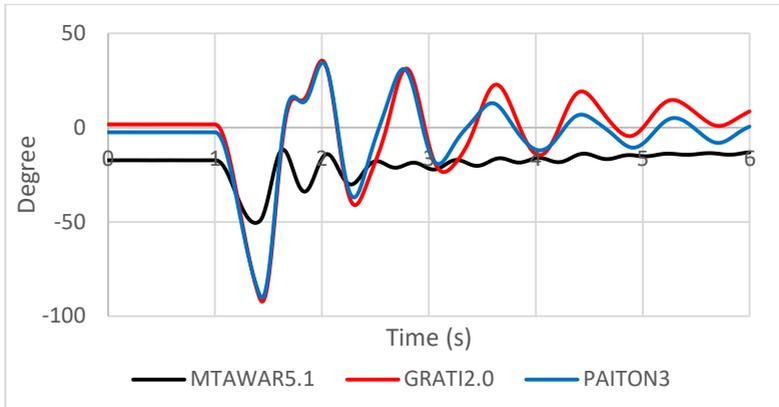
**Gambar 4.34** Frekuensi range tidak aman, CB *Open* 1.016 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.33 semua frekuensi pada generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Muara Tawar5.1 mencapai 53.839 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi berada pada range yang tidak aman.

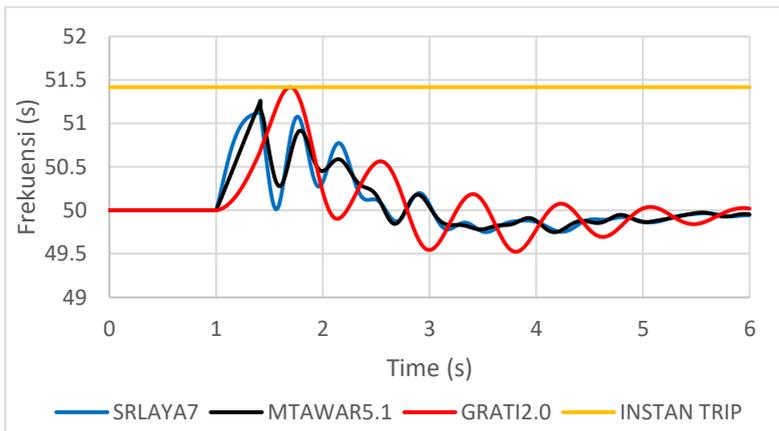
Dapat dilihat pada Gambar 4.34 semua frekuensi generator mengalami osilasi yang terbesar adalah frekuensi generator Muara Tawar5.1 mencapai 52.9 Hz melebihi batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Sehingga frekuensi berada pada range yang tidak aman, walaupun sudut rotor sudah pada keadaan stabil. Sehingga perlu dicari waktu CB *Open* dengan nilai frekuensi pada nilai yang aman.

**b. Menemukan waktu pemutusan kritis frekuensi pada range aman**

Dapat dilihat pada Gambar 4.35 semua sudut rotor generator mengalami osilasi, yang terbesar adalah sudut rotor generator Grati2.0 dengan minimal  $-92.35^\circ$  dan maksimal  $35.61^\circ$  tetapi masih dapat menurun hingga dibawah  $90^\circ$  dan mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan  $-8.71^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.35** Sudut rotor stabil, CB *Open* 0.417 detik



**Gambar 4.36** Frekuensi range aman, CB *Open* 0.417 detik

Dapat dilihat pada Gambar 4.36 frekuensi pada generator Grati2.0 mengalami isolasi mencapai 51.415 Hz yang nilainya kritis dibawah batas frekuensi yang dilarang pada standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 yaitu 51.417 Hz. Nilai frekuensi mulai kembali pada keadaan *steady state* pada detik ke 6 dengan 50.019 Hz dan masih dalam batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz. Dapat disimpulkan pada CB *Open* 0.303s sudut rotor stabil dan frekuensi pada range aman.

### 4.3 Penentuan Waktu *Single Pole Auto Reclosing Time*

Pada sistem kelistrikan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah adalah salah satu dari jenis gangguan yang paling banyak terjadi. Sehingga pada studi kasus *single pole auto recloser* ini dicari lokasi bus dengan nilai hubung singkat terbesar untuk mencari waktu pemutusan saluran dan penutupan saluran kembali dengan cara menganalisa kestabilan transien pada sistem.

Dengan menggunakan standar *voltage sag SEMI F47* yang memberi batas lama waktu kedip tegangan, untuk kedip tegangan 50% dari tegangan nominal 500 kV yaitu 250 kV diperbolehkan selama 0.2 detik, untuk kedip tegangan 70% dari tegangan nominal 500 kV yaitu 350 kV diperbolehkan selama 0.5 detik, dan untuk kedip tegangan 80% dari tegangan nominal 500 kV yaitu 400 kV diperbolehkan selama 1 detik. Untuk waktu tunda (*dead time*) CB menutup kembali direkomendasikan oleh PLN untuk jenis *single pole auto reclose (SPAR)* dengan waktu 0.8 – 1 detik dan untuk studi kasus *single pole auto reclosing* ini dipakai 0.9 detik.

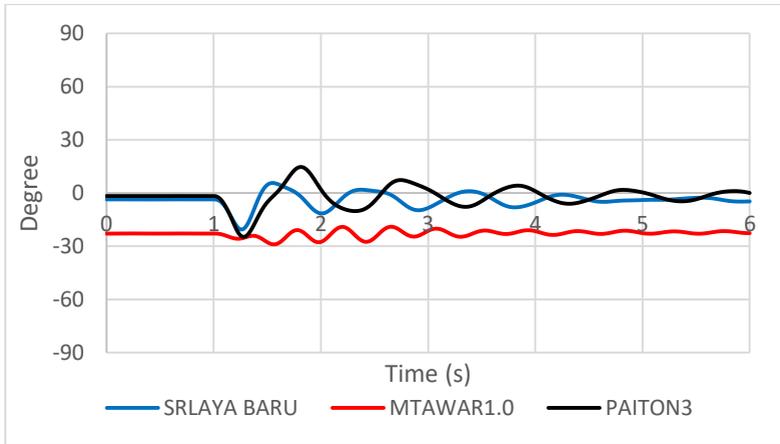
#### 4.3.1 Pada saat Beban *Peak*, Saluran Muara Tawar – Bekasi (SC 1 Fasa ke Tanah di Dekat Bus Muara Tawar)

Dari data hasil simulasi untuk mengetahui bus dengan arus hubung singkat 1 fasa terbesar, digunakan satu bus dengan hubung singkat 1 fasa terbesar yang akan dianalisa kestabilan transiennya untuk mencari waktu pemutusan saluran dan penutupan saluran kembali pada saat kondisi beban *peak*, yaitu bus Muara Tawar. Berikut ini adalah Tabel 4.10 hasil simulasi *single pole auto reclosing* yang telah didapatkan yaitu:

**Tabel 4.10** Hasil simulasi *single pole auto reclosing*, kondisi beban *peak*

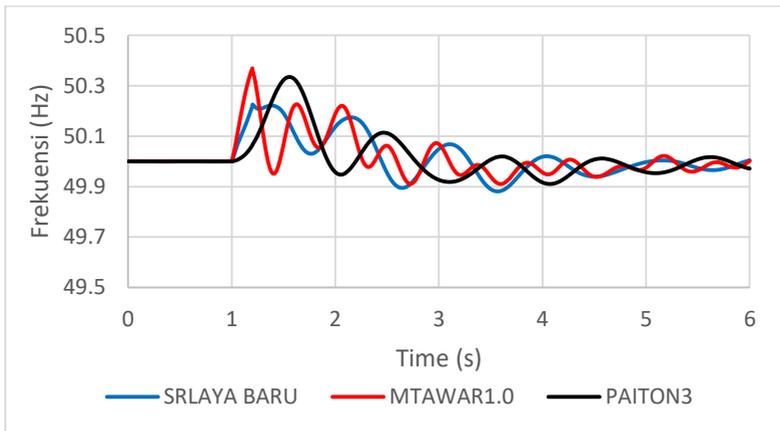
Saluran	CB <i>trip</i> (detik)	CB <i>reclose</i> (detik)
Muara Tawar-Bekasi	0.2	0.9

Pada hasil simulasi pada kasus *single pole auto reclosing time* ini didapatkan waktu CB membuka dengan waktu maksimal berdasarkan standar kedip tegangan *voltage sag SEMI F47* yaitu apabila kedip tegangan turun mencapai 70% sampai 50% dari tegangan nominal diijinkan selama 0.2 detik, dan CB menutup kembali berdasarkan rekomendasi PLN dengan 0.9 detik.



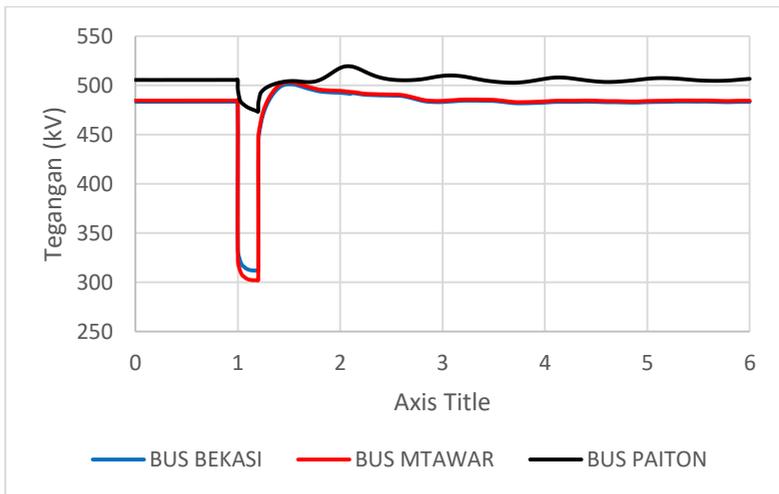
**Gambar 4.37** Sudut rotor pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka

Dapat dilihat pada Gambar 4.37 sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat segera kembali pada kondisi *steady state*, pada sudut rotor generator Muara Tawar1.0 dari  $-22.9^\circ$  pada detik ke 6 menjadi  $-22.68^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.38** Frekuensi pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka

Dapat dilihat pada Gambar 4.38 frekuensi pada semua generator mengalami osilasi frekuensi dengan osilasi yang terbesar yaitu pada frekuensi generator Muara Tawar 1.0 mencapai 50.369 Hz dan dapat kembali *steady state* pada detik ke 6 dengan 50.001 Hz atau kembali pada frekuensi nominal sistem. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi dalam range yang aman sesuai standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz



**Gambar 4.39** Tegangan pada bus, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka

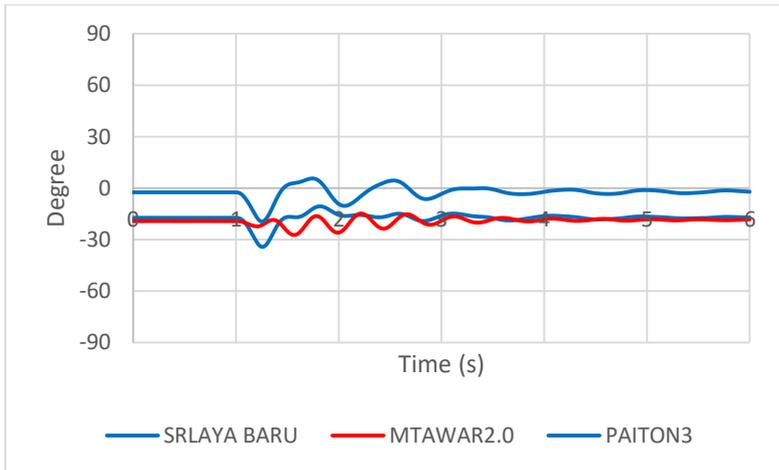
Dapat dilihat pada Gambar 4.39 tegangan pada bus ditempat gangguan yaitu bus Muara Tawar terjadi penurunan tegangan hingga 302.019 kV atau 60.4% dari nominal tegangan 500 kV, sesuai standar voltage sag SEMI F47 untuk kedip tegangan 50% dari tegangan nominal diperbolehkan selama 0.2 detik, untuk kedip tegangan 70% dari tegangan nominal diperbolehkan selama 0.5 detik. Karena kedip tegangan pada bus Muara Tawar 60.4% diatas 50% dan dibawah 70% maka diperbolehkan selama 0.2 detik, jadi CB memutuskan saluran pada 0.2 detik setelah gangguan. Tegangan pada bus Muara Tawar dapat kembali *steady state* pada detik ke 6 dengan 484.439 kV dan masih dalam range tegangan yang aman, sesuai standar PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$  yaitu 475 – 525 kV.

### 4.3.2 Pada saat Beban *light*, Saluran Muara Tawar – Bekasi (SC 1 Fasa ke Tanah di Dekat Bus Muara Tawar)

Sama seperti *studi kasus single pole auto reclosing* beban *peak* sebelumnya dari data hasil simulasi untuk mengetahui bus dengan arus hubung singkat 1 fasa terbesar, digunakan satu bus dengan hubung singkat 1 fasa terbesar yang akan dianalisa kestabilan transiennya untuk mencari waktu pemutusan saluran dan penutupan saluran kembali pada saat kondisi beban *light*, yaitu bus Muara Tawar. Berikut ini adalah Tabel 4.11 hasil simulasi *single pole auto reclosing* yang telah didapatkan:

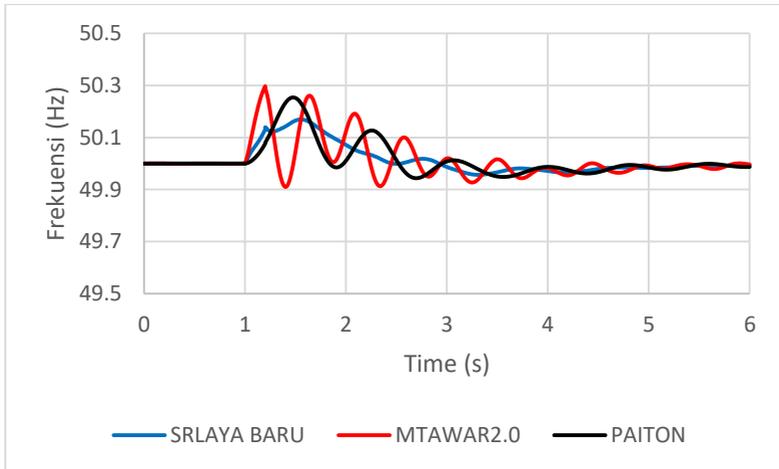
**Tabel 4.11** Hasil simulasi *single pole auto reclosing*, kondisi beban *light*

Saluran	CB trip (detik)	CB reclose (detik)
Muara Tawar-Bekasi	0.2	0.9



**Gambar 4.40** Sudut rotor pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka

Dapat dilihat pada Gambar 4.40 sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat segera kembali pada kondisi *steady state*, pada sudut rotor generator Paiton3 dari  $-2.42^\circ$  pada detik ke 6 menjadi  $-2.09^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.

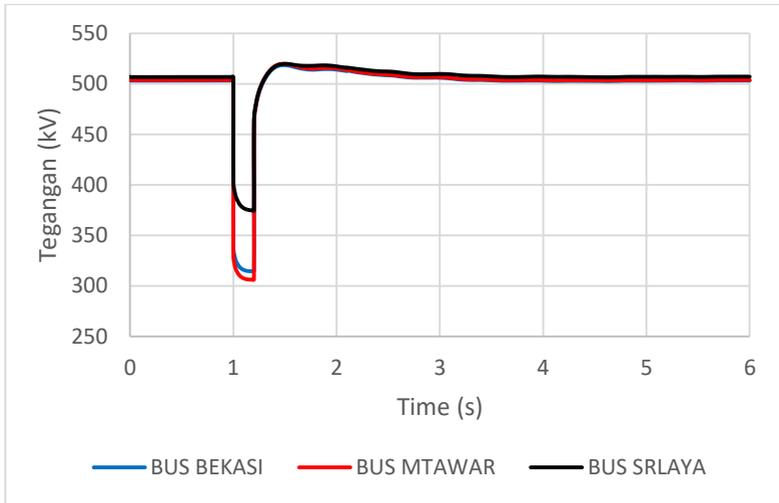


**Gambar 4.41** Frekuensi pada generator, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka

Dapat dilihat pada Gambar 4.41 frekuensi pada semua generator mengalami osilasi frekuensi dengan osilasi yang terbesar yaitu pada frekuensi generator Muara Tawar2.0 mencapai 50.297 Hz dan dapat kembali *steady state* pada detik ke 6 dengan 49.996 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi dalam range yang aman sesuai standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz.

Pada kasus *single pole auto reclosing time* respon dari sudut rotor dapat kembali stabil dan frekuensi masih dalam range aman, tetapi pada respon tegangan terjadi kedip tegangan yang batas maksimal pemutusan saluran untuk menghilangkan gangguan dengan acuan standar kedip tegangan *voltage sag* SEMI 47. Setelah CB membukan maka akan dilakukan penutupan CB kembali dikarenakan gangguan yang bersifat temporer.

*Dead time* atau waktu penutupan kembali merupakan waktu penundaan CB untuk menutup kembali setelah CB trip untuk menghilangkan gangguan. Waktu yang penundaan penutupan kembali dapat dipengaruhi waktu minimal yang digunakan untuk menghilangkan deionisasi dan busur api setelah CB trip dan waktu maksimal berdasarkan kestabilan pada sistem.



**Gambar 4.42** Tegangan pada bus, CB membuka 0.2 detik dan CB menutup kembali 0.9 detik setelah CB membuka

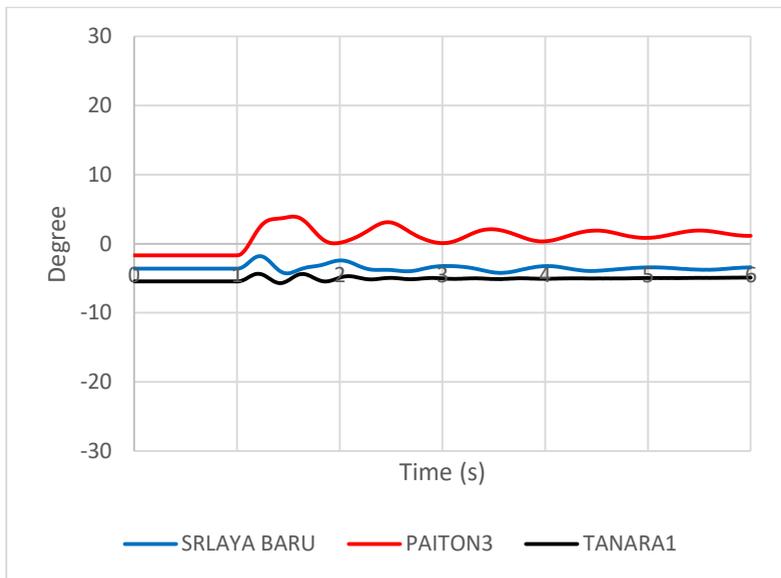
Dapat dilihat pada Gambar 4.42 tegangan pada bus ditempat gangguan yaitu bus Muara Tawar terjadi penurunan tegangan terbesar hingga 306.165 kV atau 61.233% dari nominal tegangan 500 kV, sesuai standar voltage sag SEMI F47 untuk kedip tegangan 50% dari tegangan nominal diperbolehkan selama 0.2 detik, untuk kedip tegangan 70% dari tegangan nominal diperbolehkan selama 0.5 detik. Karena kedip tegangan pada bus Muara Tawar 61.233% diatas 50% dan dibawah 70% maka diperbolehkan selama 0.2 detik, jadi CB memutuskan saluran pada 0.2 detik setelah gangguan. Tegangan pada bus Muara Tawar dapat kembali *steady state* pada detik ke 6 dengan 504 kV dan masih dalam range tegangan yang aman sesuai standar PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$  yaitu 475 – 525 kV.

#### 4.4 Pelepasan Pembangkit

Untuk studi kasus pelepasan pembangkit akan disimulasikan pelepasan pembangkit yang terbesar yang interkoneksi dengan sistem dan dilihat kestabilan transiennya. Pada studi kasus ini akan dilakukan dua percobaan yaitu pada kondisi beban *peak* dan kondisi beban *light*. Percobaan ini yang dilihat adalah respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan.

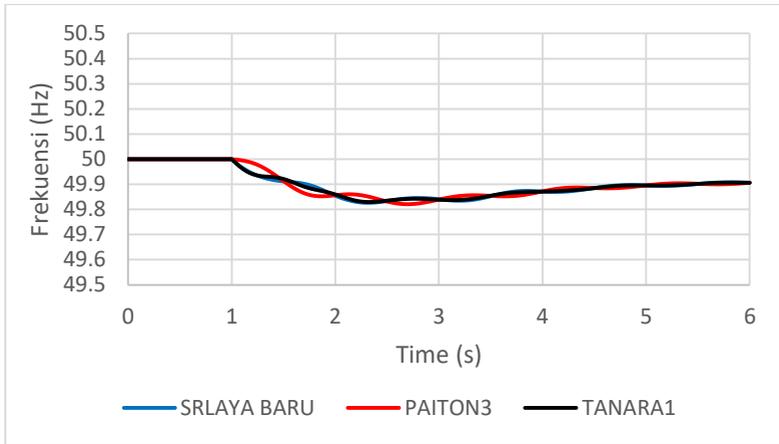
#### 4.4.1 Pada saat Beban *Peak* (Generator Bojanegara1 Lepas)

Pada studi kasus pelapasan pembangkit pada kondisi beban *peak*, generator Bojanegara1 dengan kapasitas 1000 MW dengan pembangkitan 675 MW akan lepas dari sistem interkoneksi. Pada sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali 500 kV pada tahun 2019 kondisi beban *peak* kapasitas generator yang aktif 29102 MW dengan daya yang dibangkitkan 19425 MW dan daya kebutuhan beban 19302.1 MW. Sehingga pada saat generator Bojanegara lepas dari sistem, maka sistem kehilangan 675 MW atau 3.475% dari daya total yang dibangkitkan sistem, tetapi kapasitas pembangkit sistem yang masih aktif dapat mencukupi kebutuhan untuk beban. Berikut ini adalah hasil simulasi pelapasan pembangkit:



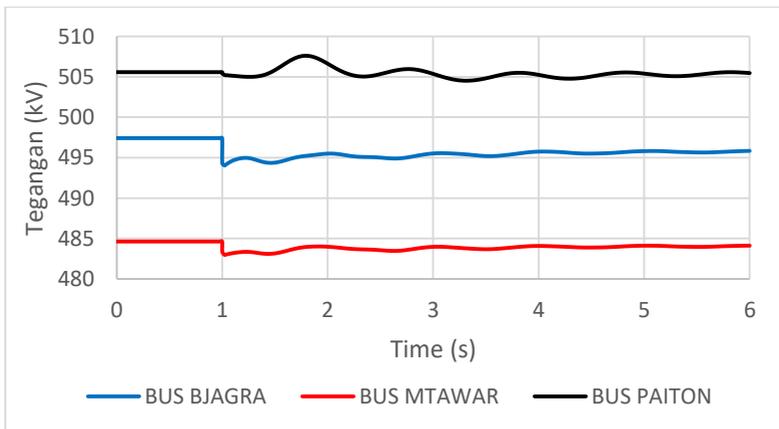
**Gambar 4.43** Sudut rotor pada generator, generator Bojanegara1 lepas

Dapat dilihat pada Gambar 4.43 sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat segera kembali pada kondisi *steady state*, pada sudut rotor generator Paiton3 dari nilai awal  $-1.68^\circ$  pada detik ke 6 menjadi  $1.15^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.44** Frekuensi pada generator, generator Bojanegara I lepas

Dapat dilihat pada Gambar 4.44 frekuensi pada semua generator menurun, pada frekuensi generator Paiton3 menurun sampai 49.821 Hz dan tetapi dapat kembali meningkat ketika *steady state* pada detik ke 6 dengan 49.906 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi dalam range yang aman sesuai standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz.

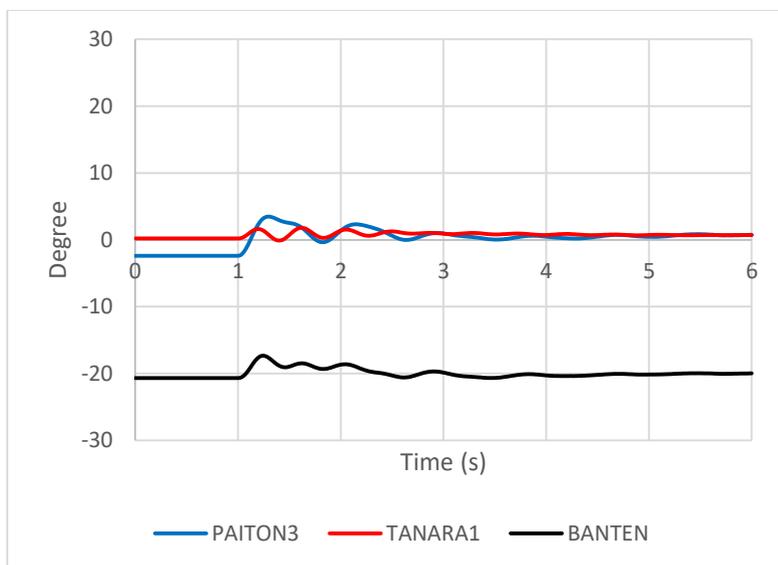


**Gambar 4.45** Tegangan pada bus, generator Bojanegara I lepas

Dapat dilihat pada Gambar 4.45 nilai tegangan pada bus Bojanegara turun dari 497.41 kV menjadi 495.831 kV, tegangan pada bus Muara Tawar turun dari 484.63 kV menjadi 484.116 kV dan tegangan pada bus Paiton sedikit menurun dari 505.575 kV menjadi 505.46 kV. Tetapi masih dalam range tegangan yang aman sesuai standar PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$  yaitu 475 – 525 kV.

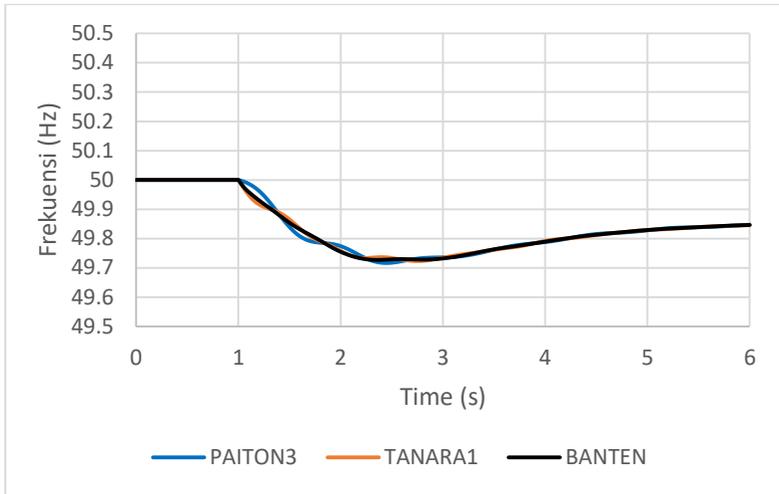
#### 4.4.2 Pada saat Beban *light* (Generator Bojanegara1 Lepas)

Pada studi kasus pelapasan pembangkit pada kondisi beban *light*, generator Bojanegara1 dengan kapasitas 1000 MW dengan pembangkitan 675 MW akan lepas dari sistem interkoneksi. Pada sistem interkoneksi Jawa-Madura-Bali 500 kV pada tahun 2019 kondisi beban *light* kapasitas generator yang aktif 18153 MW dengan daya yang dibangkitkan 9710 MW dan daya kebutuhan beban 9651.05 MW. Sehingga pada saat generator Bojanegara lepas dari sistem, maka sistem kehilangan 675 MW atau 7 % dari daya total yang dibangkitkan sistem, tetapi kapasitas pembangkit sistem yang masih aktif dapat mencukupi kebutuhan untuk beban. Berikut ini adalah hasil simulasi pelepasan pembangkit:



**Gambar 4.46** Sudut rotor pada generator, generator Bojanegara1 lepas

Dapat dilihat pada Gambar 4.46 sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat segera kembali pada kondisi *steady state*, pada sudut rotor generator Paiton3 dari nilai awal  $-2.39^\circ$  pada detik ke 6 menjadi  $0.76^\circ$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.

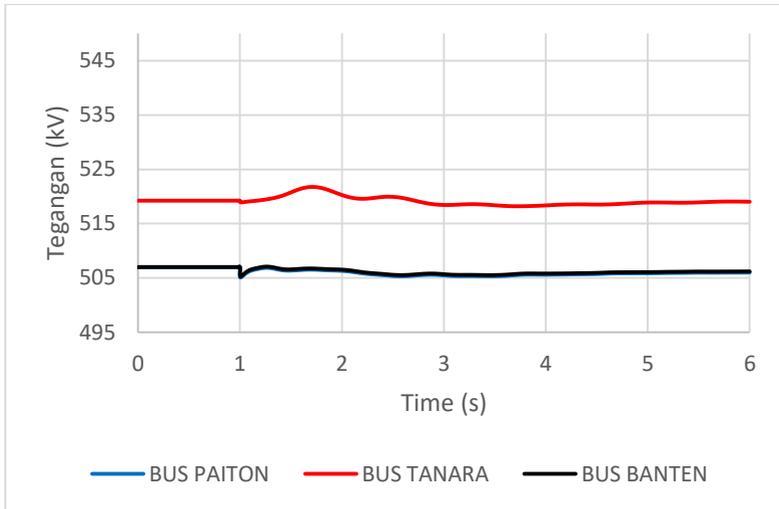


**Gambar 4.47** Frekuensi pada generator, generator Bojanegara1 lepas

Dapat dilihat pada Gambar 4.47 frekuensi pada semua generator menurun, pada frekuensi generator Paiton3 menurun sampai 49.716 Hz dan tetapi dapat kembali meningkat ketika *steady state* pada detik ke 6 dengan 49.847 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi dalam range yang aman sesuai standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz

Pada kasus pelepasan generator Bojanegara1 dengan pembangkitan 675 MW lepas dari sistem yang mengakibatkan generator aktif yang interkoneksi mengalami penambahan pembebanan, untuk terus menyesuaikan dengan kebutuhan beban.

Pada generator yang aktif pada sistem interkoneksi mengalami penurunan frekuensi yang dikarenakan putaran dari pembangkit berkurang untuk menyuplai kebutuhan beban yang sebelumnya dibebani pada pembangkit Bojanegara1.



**Gambar 4.48** Tegangan pada bus, generator Bojanegara I Lepas

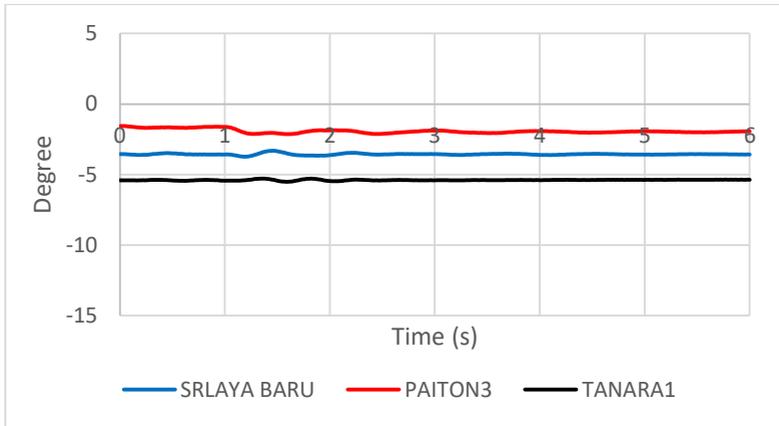
Dapat dilihat pada Gambar 4.48 nilai tegangan pada bus Paiton<sup>3</sup> dan bus Banten sama yaitu dari tegangan 507 kV menjadi 506 kV dan tegangan pada bus Tanara sedikit menurun dari 507 kV menjadi 506.21 kV. Tetapi masih dalam range tegangan yang aman sesuai standar PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$  yaitu 475 – 525 kV.

## 4.5 Pelepasan Satu Saluran dari Saluran Ganda Tanpa Gangguan

Pada studi kasus pelepasan satu saluran dari saluran ganda tanpa gangguan untuk melihat kestabilan transien pada sistem dengan melepaskan satu saluran dengan aliran daya yang terbesar melewati saluran ganda, tetapi daya masih dapat disalurkan dengan satu saluran. Pada studi kasus ini dilakukan dua percobaan yaitu pada kondisi beban *peak* dan beban *light*.

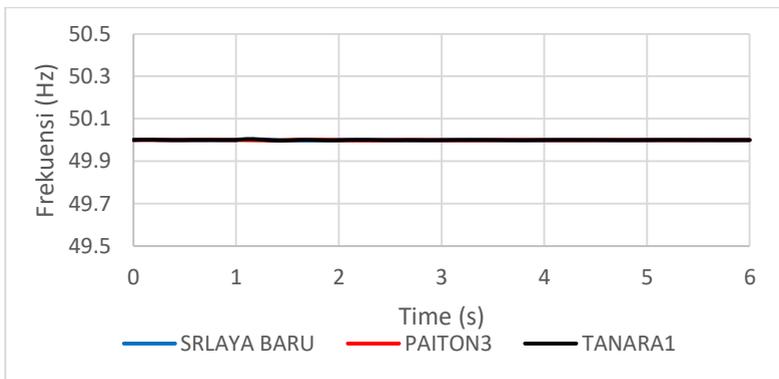
### 4.5.1 Pada saat Beban *Peak*, Saluran Cikupa – Balaraja

Dengan hasil simulasi aliran daya maka dapat mengetahui aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran. Pada kondisi beban *peak* aliran daya terbesar berada pada saluran Cikupa – Balaraja dengan daya yang melewati sebesar 2226.154 MW. Berikut adalah hasil simulasinya:



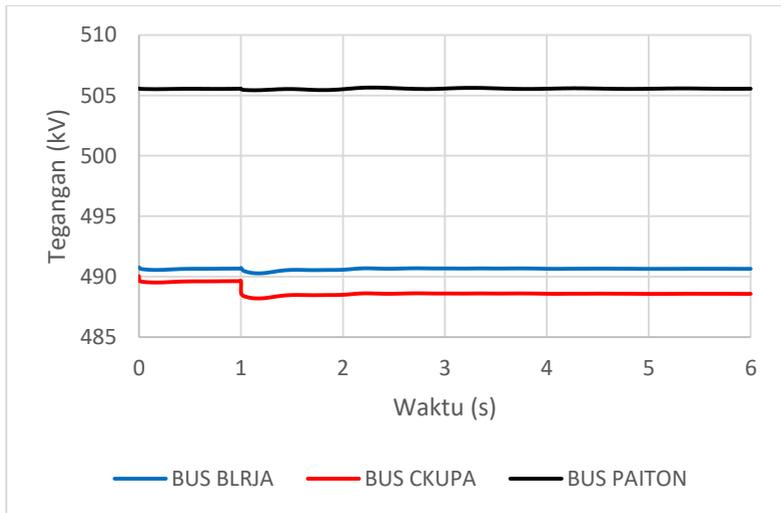
**Gambar 4.49** Sudut rotor pada generator, ketika pelapasan satu saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.49 sudut rotor pada generator mengalami perubahan kecil tetapi dapat kembali pada keadaan *steady state*. Pada sudut rotor generator Suralaya Baru mengalami perubahan dari  $-3.55^\circ$  menjadi  $3.58^\circ$ , generator Paiton3 dari  $-1.56^\circ$  menjadi  $-1.94^\circ$  dan generator Tanara1 dari  $-5.41$  menjadi  $-5.37$ . Pada gangguan ini tidak banyak mempengaruhi kestabilan sistem dikarenakan pada pelepasan satu saluran dari saluran ganda terdapat satu saluran yang masih bisa digunakan untuk penyaluran daya yang berfungsi sebagai backup. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.50** Frekuensi pada generator, ketika pelapasan satu saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.50 frekuensi pada semua generator masih dalam frekuensi nominalnya yaitu 50 Hz. Pada gangguan ini tidak banyak mempengaruhi kestabilan sistem dikarenakan pada pelepasan satu saluran dari saluran ganda terdapat satu saluran yang masih bisa digunakan untuk penyaluran daya. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi dalam range yang aman sesuai standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz.

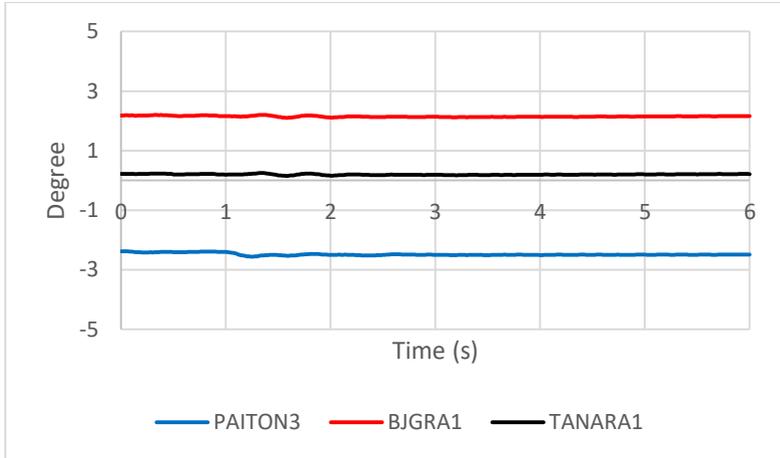


**Gambar 4.51** Tegangan pada bus, ketika pelepasan satu saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.51 nilai tegangan pada bus Cikupa mengalami penurunan tegangan yaitu dari tegangan 490.039 kV menjadi 488.578 kV. Tetapi masih dalam range tegangan yang aman sesuai standar PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$  yaitu 475 – 525 kV.

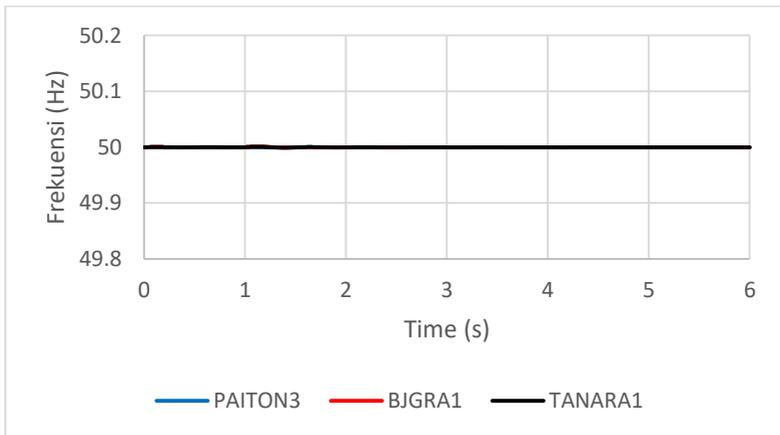
#### 4.5.2 Pada saat Beban *light*, Saluran Cikupa – Balaraja

Dengan hasil simulasi aliran daya maka dapat mengetahui aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran. Pada kondisi beban *light* aliran daya terbesar berada pada saluran Cikupa – Balaraja dengan daya yang melewati sebesar 933.392 MW. Berikut adalah hasil simulasinya:



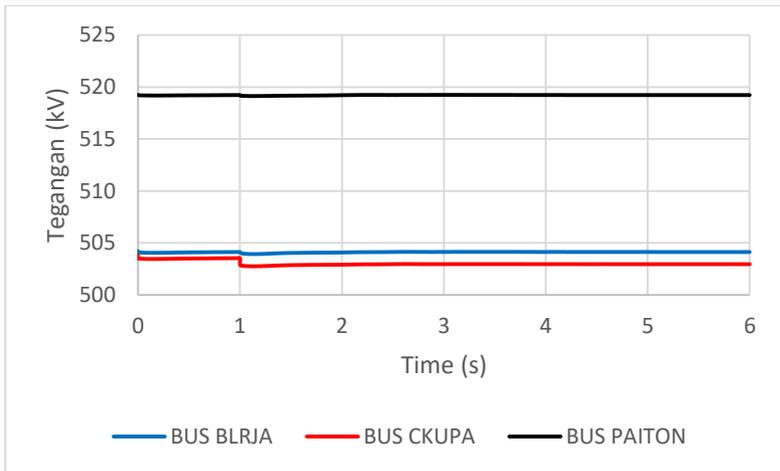
**Gambar 4.52** Sudut rotor pada generator, ketika pelapasan satu saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.52 sudut rotor pada generator mengalami perubahan kecil tetapi dapat kembali pada nilai sudut rotor semula. pada gangguan ini tidak banyak mempengaruhi kestabilan sistem dikarenakan pada pelepasan satu saluran dari saluran ganda terdapat satu saluran yang masih bisa digunakan untuk penyaluran daya yang berfungsi sebagai backup. Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.53** Frekuensi pada generator, ketika pelapasan satu saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.53 frekuensi tidak mengalami osilasi dan pada semua generator masih tetap dalam frekuensi nominalnya yaitu 50 Hz. Pada gangguan ini tidak banyak mempengaruhi kestabilan sistem dikarenakan pada pelepasan satu saluran dari saluran ganda terdapat satu saluran yang masih bisa digunakan untuk penyaluran daya. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi dalam range yang aman sesuai standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz.



**Gambar 4.54** Tegangan pada bus, ketika pelepasan satu saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.54 nilai tegangan pada bus Cikupa mengalami penurunan tegangan yaitu dari tegangan 503.815 kV menjadi 502.96 kV dan pada bus Paiton dengan tegangan 519.225 kV, tetapi masih dalam range tegangan yang aman sesuai standar PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$  yaitu 475 – 525 kV.

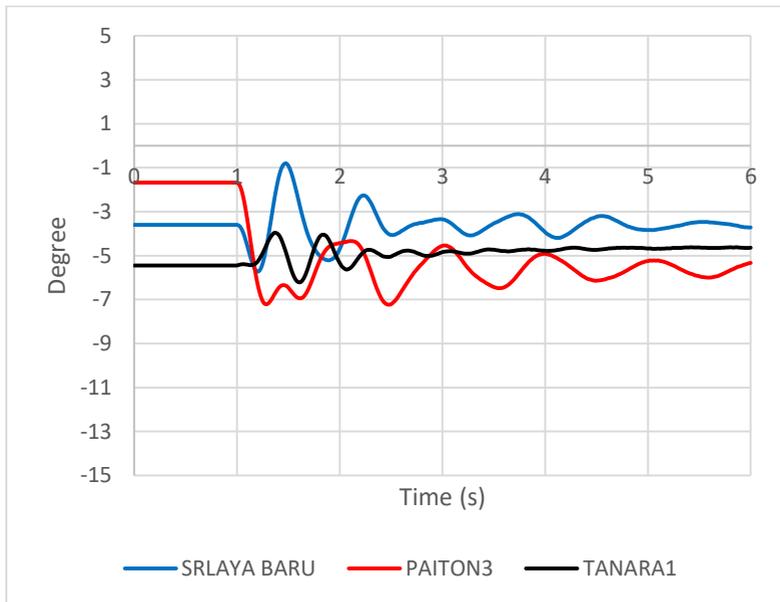
#### 4.6 Pelepasan Dua Saluran dari Saluran Ganda tanpa Gangguan

Pada studi kasus pelepasan dua saluran dari saluran ganda tanpa gangguan untuk melihat kestabilan transien pada sistem, dengan melepaskan dua saluran dari saluran ganda dengan aliran daya yang terbesar melewati saluran pada sistem interkoneksi. Pada studi kasus ini

lepasnya interkoneksi dapat mengakibatkan ketidakstabilan pada sistem karena perubahan aliran daya tiba-tiba. Pada studi kasus ini akan dilakukan dua percobaan yaitu dengan kondisi beban *peak* dan beban *light*.

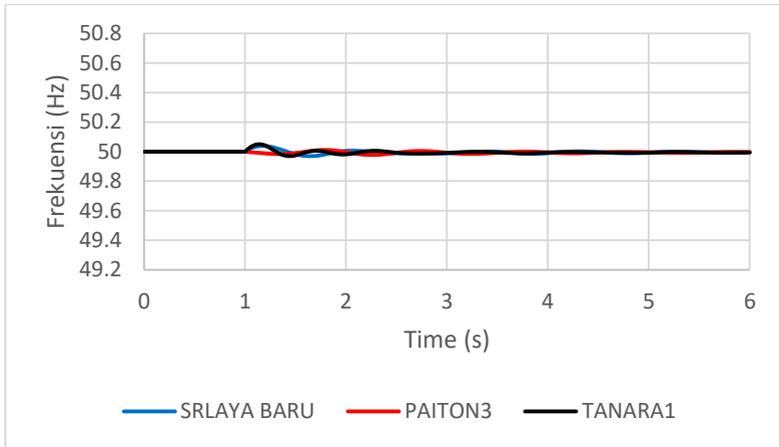
#### 4.6.1 Pada saat Beban *Peak*, Saluran Cikupa – Balaraja

Dengan hasil simulasi aliran daya maka dapat mengetahui aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran. Pada kondisi beban *peak* aliran daya terbesar berada pada saluran Cikupa – Balaraja dengan daya yang melewati sebesar 2226.154 MW. Berikut adalah hasil simulasinya:



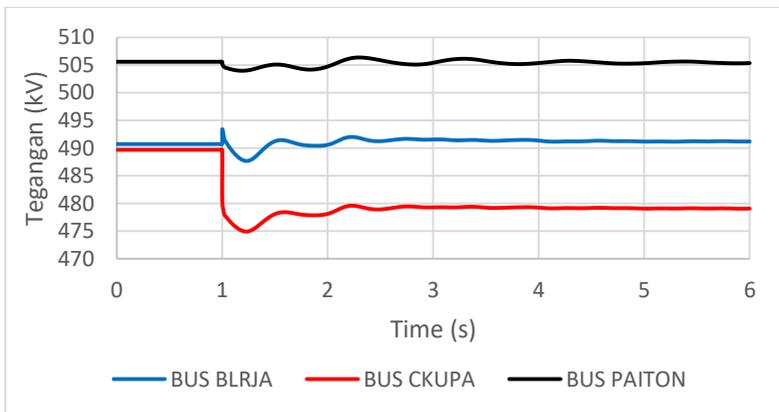
**Gambar 4.55** Sudut rotor pada generator, ketika pelapasan dua saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.55 sudut rotor semua generator mengalami osilasi tetapi dengan ayunan yang kecil sehingga dapat kembali pada kondisi *steady state*. Pada sudut rotor generator Paiton3 dari nilai awal  $-2.39^\circ$  pada detik ke 6 menjadi  $-5.33^\circ$ , pada generator Suralaya-baru dari  $-3.6$  menjadi  $-3.72$ , dan pada generator Tanara1 dari  $-5.45$  menjadi  $-4.64$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.56** Frekuensi pada generator, ketika pelapasan dua saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.56 frekuensi pada semua generator mengalami osilasi frekuensi yang kecil dengan osilasi pada frekuensi yang kecil dengan osilasi pada frekuensi generator Muara Tawar 1.0 mencapai 50.05 Hz dan dapat kembali *steady state* pada detik ke 6 dengan 49.97 Hz atau kembali mendekati pada frekuensi nominal sistem. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi dalam range yang aman sesuai standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz

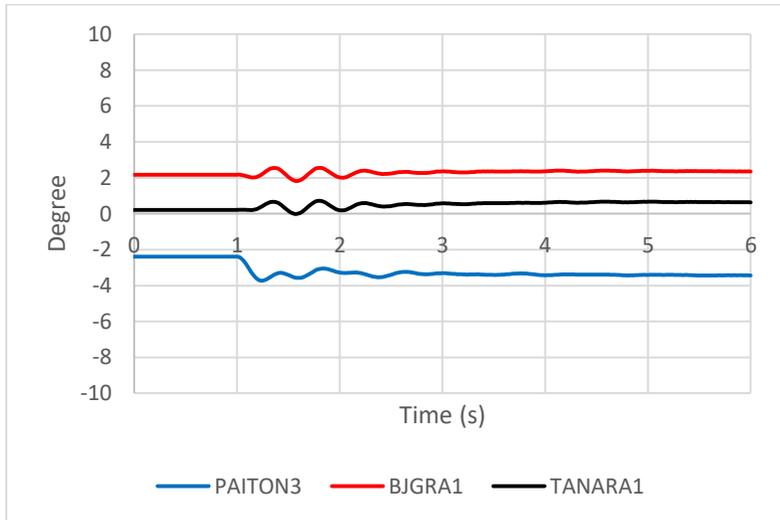


**Gambar 4.57** Tegangan pada bus, ketika pelapasan dua saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.57 nilai tegangan pada bus Cikupa mengalami penurunan tegangan dari 489.672 kV menurun hingga 474.933 kV dibawah standar PLN yaitu 475 kV untuk *undervoltage* dan pada keadaan *steady state* tegangan dapat kembali meningkat dengan nilai tegangan 479.072 kV, sehingga masih dalam range tegangan yang aman sesuai standar PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$  yaitu 475 – 525 kV.

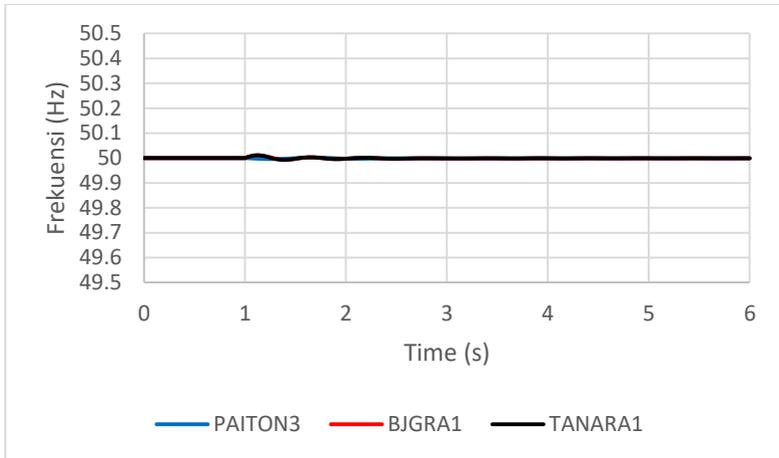
#### 4.6.2 Pada saat Beban *light*, Saluran Cikupa – Balaraja

Dengan hasil simulasi aliran daya maka dapat mengetahui aliran daya terbesar yang mengalir pada saluran. Pada kondisi beban *light* aliran daya terbesar berada pada saluran Cikupa – Balaraja dengan daya yang melewati sebesar 933.392 MW. Berikut adalah hasil simulasinya:



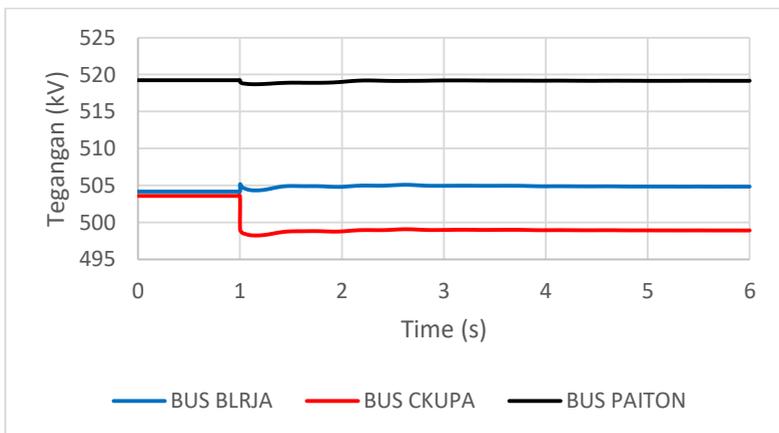
**Gambar 4.58** Sudut rotor pada generator, ketika pelapasan dua saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.58 sudut rotor pada generator mengalami perubahan kecil tetapi dapat kembali pada keadaan *steady state*. Pada sudut rotor generator Paiton3 mengalami perubahan sudut rotor dari  $-2.39^\circ$  menjadi  $-3.44^\circ$ , generator Bojanegara dari  $2.17^\circ$  menjadi  $2.35^\circ$  dan generator Tanara1 dari  $0.21$  menjadi  $-0.63$ . Sehingga dapat disimpulkan sudut rotor stabil.



**Gambar 4.59** Frekuensi pada generator, ketika pelapasan dua saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.59 frekuensi mengalami osilasi yang sangat kecil dan pada semua generator masih tetap dalam frekuensi nominalnya yaitu 50 Hz. Sehingga dapat disimpulkan frekuensi dalam range yang aman sesuai standar frekuensi IEEE Std C37.106-2003 batas standar frekuensi dengan *continuous operating range* 49.583 – 50.417 Hz.



**Gambar 4.60** Tegangan pada generator, ketika pelapasan dua saluran

Dapat dilihat pada Gambar 4.60 nilai tegangan pada bus Cikupa mengalami penurunan tegangan dari 503.575 kV menurun hingga 498.219 kV dan pada keadaan *steady state* tegangan dapat kembali meningkat dengan nilai tegangan 498.901 kV, sehingga masih dalam range tegangan yang aman sesuai standar PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$  yaitu 475 – 525 kV.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi dan analisis, dapat ditarik kesimpulan pada Tugas Akhir ini, yaitu:

1. Untuk kasus mencari nilai *critical clearing time* (CCT) terjadi hubung singkat 3 fasa terbesar yaitu di bus Gandul pada saluran Gandul-lekong. Pada kondisi beban puncak didapatkan waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil dan tidak stabil adalah 0.543 – 0.544 detik, dan waktu pemutusan kritis frekuensi aman dan tidak aman sesuai standar IEEE Std C37.106-2003 adalah 0.252 – 0.253 detik. Pada kondisi beban *light* didapatkan waktu pemutusan kritis sudut rotor stabil dan tidak stabil adalah 0.509 – 0.51 detik, dan waktu pemutusan kritis frekuensi aman dan tidak aman sesuai standar IEEE Std C37.106-2003 adalah 0.308 – 0.309 detik.
2. Untuk kasus *single pole auto reclosing* terjadi hubung singkat 1 fasa ke tanah terbesar yaitu di Bus Muara Tawar pada saluran Muara Tawar – Bekasi. Pada kondisi beban puncak tegangan pada bus Muara Tawar mengalami penurunan tegangan sampai 60.4% dan pada kondisi beban *light* sampai 61.233% sehingga CB membuka 0.2 detik setelah gangguan, sesuai dengan standar *voltage sag* SEMI F47 dan menutup kembali 0.9 detik berdasarkan rekomendasi PLN.
3. Untuk kasus pelepasan pembangkit yaitu generator Bojanegara1 dengan kapasitas 1000 MW dan pembangkitan 675 MW lepas dari sistem, pada kondisi beban puncak sistem hanya kehilangan 3.475% dan pada kondisi beban *light* sistem kehilangan 7% dari total daya yang dibangkitkan sistem, tetapi kapasitas daya pada pembangkit yang aktif pada sistem masih mencukupi kebutuhan beban.
4. Untuk kasus pelepasan satu saluran dari saluran ganda, pelepasan satu saluran tidak banyak mempengaruhi kestabilan sistem karena terdapat satu saluran yang dapat dipakai sebagai *backup* untuk menyalurkan daya.
5. Untuk kasus pelepasan dua saluran dari saluran ganda, pada saluran dengan aliran daya terbesar yaitu saluran Cikupa - Balaraja, menyebabkan penurunan pada bus Cikupa, pada kondisi

beban puncak dari 489.672 kV menjadi 474.933 kV dan pada kondisi beban *light* 503.575 kV menjadi 498.219 kV, tetapi nilainya masih dalam range standar tegangan PLN untuk tegangan nominal 500 kV dengan  $\pm 5\%$ .

## 5.2 Saran

Saran setelah dilakukan analisa yang dapat memberikan perbaikan ialah berikut ini:

1. Karena pada Tugas Akhir ini hanya melakukan lima jenis kasus untuk masalah kestabilan transien, maka untuk melakukan analisa kestabilan transien yang lebih baik lagi, dapat menambahkan lebih banyak jenis kasus masalah kestabilan transien, sehingga hasil analisis kestabilan transien yang didapatkan akan lebih akurat.

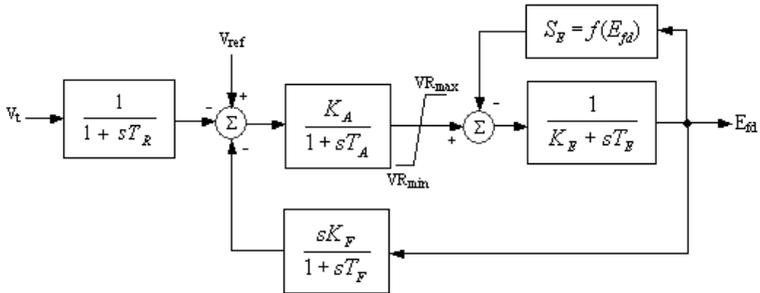
## DAFTAR PUSTAKA

1. Penangsang, Ontoseno. “*Diktat Kuliah Analisis Sistem Tenaga Listrik 2*”, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
2. IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*” IEEE Transactions on Power system , vol. 19, no. 2, may 2004.
3. Kundur, P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, Inc, 1994.
4. Saadat, H., “*Power System Analysis*”, McGraw-Hill, Inc, 1999.
5. Rezky, Prima Prahasta,” *Studi Analisa Stabilitas Transien Sistem Jawa-Madura-Bali (Jamali) 500kV Setelah Masuknya Pembangkit Paiton 1000 MW Pada Tahun 2021*”. Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya,2016.
6. ANSI/IEEE Std 399-1990, “IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial. Power Systems Analysis (IEEE Brown Book)”
7. PT PLN (Persero). "Perhitungan Setting Relai Autorclose dan Sinkro", Pusat Pendidikan dan Pelatihan
8. IEEE Std C37.106-2003, “IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants”.
9. Pasific Gas and Electric Company, “Voltage Sag Immunity Standards SEMI-F47 and F42”, Power Quality Bulletin, 2007.
10. PT PLN (Persero) No. PDM/PGL/07 : 2014, “Buku Pedoman Pemeliharaan Pemutus Tenaga (PMT)”

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN DATA EXCITER DAN GOVERNOR

### Data Exciter Type 1

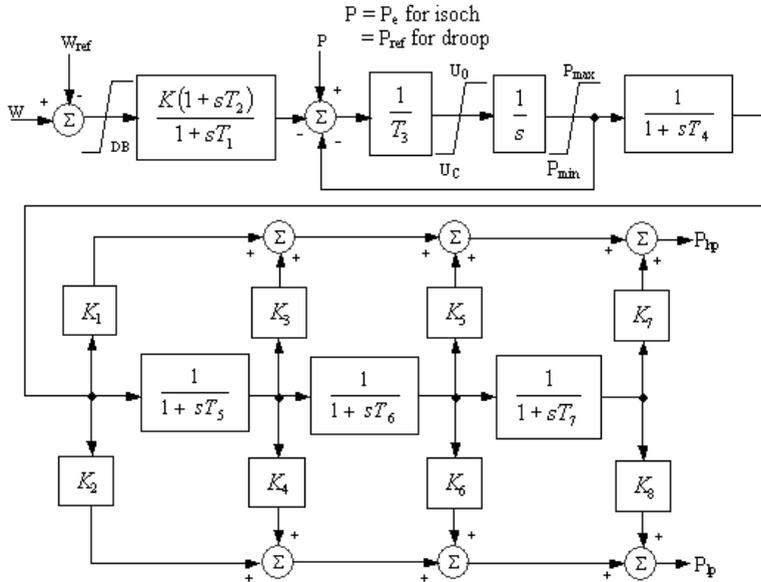


SEmax	SE.75
1.65	1.13

Efdmax	KA	KE
6.6	250	1

KF	TA	TE	TF	TR
0.06	0.03	1.25	1	0.005

## Data Governor Type STM



Droop	UO	UC	DB
5	0	-5	0

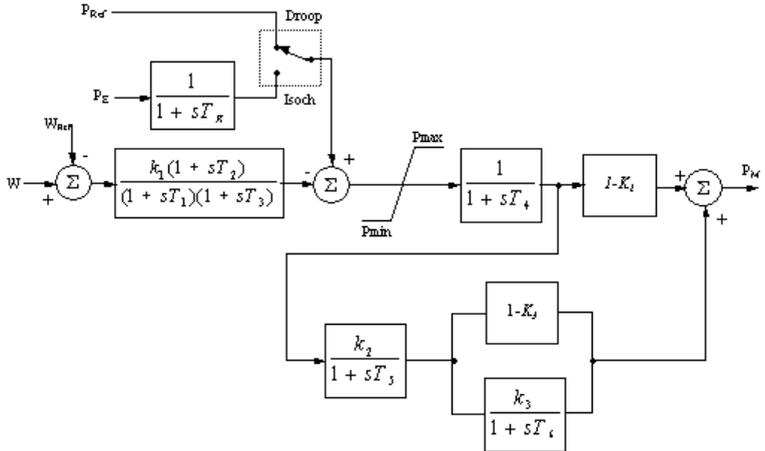
K1	K2	K3	K4	K5
0.11	0.11	0.11	0.11	0.15

K6	K7	K8
0.15	0.13	0.13

T1	T2	T3	T4	T5
0.1	0	0	0.19	11

T6	T7
0.3	0

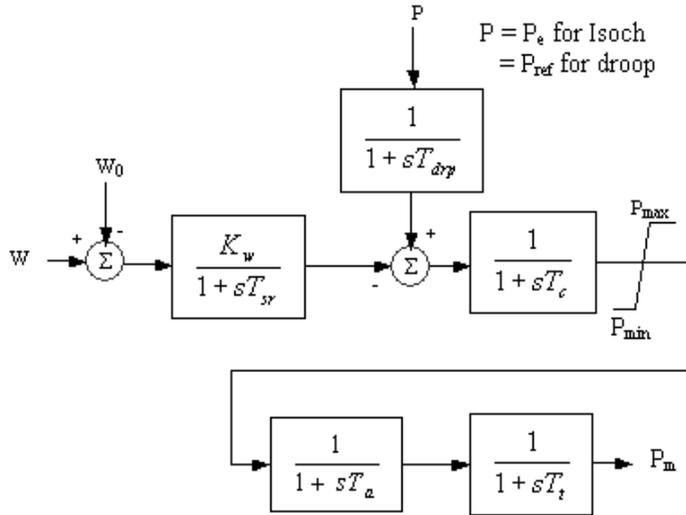
## Data Governor Type SGT



K1	K2	K3	TR
17	0	0	0

T1	T2	T3	T4	T5	T6
0.1	0	0.2	0.5	0	0

### Data Governor Type GP



Tsr	Tc	Tt	Tdrp	Ta
0.15	0.1	0.1	5	0

NO	NAMA PEMBANGKIT	TYPE	
		Exciter	GOVERNOR
1	PLTU SLAYA BARU	1	STM
2	PLTU SLAYA1	1	STM
3	PLTU SLAYA2	1	STM
4	PLTU SLAYA3	1	STM
5	PLTU SLAYA4	1	STM
6	PLTU SLAYA5	1	STM
7	PLTU SLAYA6	1	STM
8	PLTU SLAYA7	1	STM
9	PLTGU MTWAR GB1.1	1	SGT
10	PLTGU MTWAR GB1.2	1	SGT
11	PLTGU MTWAR GB1.3	1	SGT
12	PLTGU MTWAR ST1.0	1	SGT
13	PLTGU MTWAR GB2.1	1	SGT
14	PLTGU MTWAR GB2.2	1	SGT
15	PLTG MTWAR 3.1	1	SGT
16	PLTG MTWAR 3.2	1	SGT
17	PLTG MTWAR 3.3	1	SGT
18	PLTG MTWAR 4.1	1	SGT
19	PLTG MTWAR 4.2	1	SGT
20	PLTG MTWAR 4.3	1	SGT
21	PLTGU MTWAR GT 5.1	1	SGT
22	PLTGU MTWAR ST 5.0	1	SGT
23	PLTGU MTWAR 2.0	1	SGT
24	PLTGU MTWAR 3.0	1	SGT
25	PLTGU MTWAR 4.0	1	SGT
26	PLTU TJATI 1	1	STM
27	PLTU TJATI 2	1	STM

NO	NAMA PEMBANGKIT	TYPE	
		Exciter	GOVERNOR
28	PLTU TJATI 3	1	STM
29	PLTU TJATI 4	1	STM
30	PLTU TJATI 5	1	STM
31	PLTU TJATI 6	1	STM
32	PLTGU GRESIK GB2.1	1	SGT
33	PLTGU GRESIK GB2.2	1	SGT
34	PLTGU GRESIK GB2.3	1	SGT
35	PLTGU GRESIK GB3.3	1	SGT
36	PLTGU GRESIK SB2	1	SGT
37	PLTGU GRESIK SB3	1	SGT
38	PLTGU JAWA 3.1	1	SGT
39	PLTGU JAWA 3.2	1	SGT
40	PLTA CIRATA1	1	GP
41	PLTA CIRATA2	1	GP
42	PLTA CIRATA3	1	GP
43	PLTA CIRATA4	1	GP
44	PLTA CIRATA5	1	GP
45	PLTA CIRATA6	1	GP
46	PLTA CIRATA7	1	GP
47	PLTA CIRATA8	1	GP
48	PLTGU GRATI GB1.1	1	SGT
49	PLTGU GRATI GB1.2	1	SGT
50	PLTGU GRATI GB1.3	1	SGT
51	PLTGU GRATI SB1.0	1	SGT
52	PLTGU GRATI SB2.0	1	SGT
53	PLTA SAGULING1	1	GP
54	PLTA SAGULING2	1	GP

NO	NAMA PEMBANGKIT	TYPE	
		Exciter	GOVERNOR
55	PLTA SAGULING3	1	GP
56	PLTA SAGULING4	1	GP
57	PLTU ADIPALA	1	STM
58	PLTU CILACAP1	1	STM
59	PLTU CILCACAP2	1	STM
60	PLTU PAITON1	1	STM
61	PLTU PAITON2	1	STM
62	PLTU PAITON3	1	STM
63	PLTU PAITON5	1	STM
64	PLTU PAITON6	1	STM
65	PLTU PAITON7	1	STM
66	PLTU PAITON8	1	STM
67	PLTU PAITON9	1	STM
68	PLTGU PRIOK	1	SGT
69	PLTU BOJANEGARA1	1	STM
70	PLTU BOJANEGARA2	1	STM
71	PLTU TANARA1	1	STM
72	PLTU TANARA1	1	STM
73	PLTU CIREBON	1	STM
74	PLTU INDRAMAYU	1	STM
75	PLTU TJATIA-SS1	1	STM
76	PLTU TJATIA-SS2	1	STM
77	PLTA CISOKAN1	1	GP
78	PLTA CISOKAN2	1	GP
79	PLTA CISOKAN3	1	GP
80	PLTA CISOKAN4	1	GP
81	PLTGU CILAMAYA1	1	SGT

NO	NAMA PEMBANGKIT	TYPE	
		Exciter	GOVERNOR
82	PLTGU CILAMAYA2	1	SGT
83	PLTU JATENG1	1	STM
84	PLTU JATENG2	1	STM
85	PLTU BANTEN	1	STM

## RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Anizar Rizky dilahirkan pada tanggal 7 Agustus 1991 di Surabaya. Lahir sebagai anak pertama dari tiga bersaudara. Pada tahun 2005, Lulus dari SDN Ujung IX Surabaya dan melanjutkan studinya ke SLTPN 5 Surabaya. Pada tahun 2006, lulus dari SLTPN 5 Surabaya dan tahun 2009 lulus dari SMA Muhammadiyah 1 Surabaya. Penulis diterima menjadi mahasiswa D3 Jurusan Elektro Industri PENS-ITS pada tahun 2009 dan lulus pada tahun 2012. Penulis melanjutkan kuliah dengan program Lintas Jalur Institut Teknologi Sepuluh November pada tahun 2015 dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui email [anizar.rizky@gmail.com](mailto:anizar.rizky@gmail.com).

*Halaman ini sengaja dikosongkan*