

TUGAS AKHIR - EE234899

**ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN PELEPASAN
BEBAN PADA PT. PERTAMINA REFINERY UNIT (RU)
VI BALONGAN AKIBAT RENCANA INTEGRASI DAYA
PLN**

ZAKI NAZYU IRSALI

NRP 5022211014

Dosen Pembimbing

Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

NIP 197309271998031004

Dr. Ir. Margo Pujiانتara, M.T.

NIP 196603181990101001

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

(halaman ini sengaja di kosongkan)



TUGAS AKHIR - EE234899

ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN PELEPASAN BEBAN PADA PT. PERTAMINA REFINERY UNIT (RU) VI BALONGAN AKIBAT RENCANA INTEGRASI DAYA PLN

ZAKI NAZYU IRSALI

NRP 5022211014

Dosen Pembimbing

Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

NIP 197309271998031004

Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

NIP 196603181990101001

Program Studi Sarjana Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

(halaman ini sengaja di kosongkan)



FINAL PROJECT - EE234899

TRANSIEN STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING AT PT. PERTAMINA REFINERY UNIT (RU) VI BALONGAN DUE TO PLN POWER INTEGRATION PLAN

ZAKI NAZYU IRSALI

NRP 5022211014

Advisor

Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

NIP 197309271998031004

Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

NIP 196603181990101001

Study Program Bachelor of Electrical Engineering

Department of Electrical Engineering

Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2025

(halaman ini sengaja di kosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN PELEPASAN BEBAN PADA PT. PERTAMINA REFINERY UNIT (RU) VI BALONGAN AKIBAT RENCANA INTEGRASI DAYA PLN

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat

memperoleh gelar Sarjana Teknik pada

Program Studi S-1 Teknik Elektro

Departemen Teknik Elektro

Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **ZAKI NAZYU IRSALI**

NRP. 5022211014

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | | |
|---|---------------|--|
| 1. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. | Pembimbing |  |
| 2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T. | Ko-pembimbing |  |
| 3. Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng. | Penguji 1 |  |
| 4. Ir. Sjamsjul Anam, M.T. | Penguji 2 |  |
| 5. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D. | Penguji 3 |  29/02/25 |

SURABAYA

Juni, 2025

(halaman ini sengaja di kosongkan)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

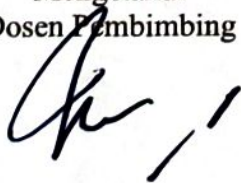
Nama mahasiswa / NRP : Zaki Nazyu Irsali / 5022211014
Program studi : Teknik Sistem Tenaga
Dosen Pembimbing / NIP : Dr. Ir. Margo Pujiانتara MT. / 196603181990101001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN PELEPASAN BEBAN PADA PT. PERTAMINA REFINERY UNIT (RU) VI BALONGAN AKIBAT RENCANA INTEGRASI DAYA PLN” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

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

Surabaya, Juli 2025

Mengetahui
Dosen Pembimbing



Dr. Ir. Margo Pujiانتara MT
NIP. 196603181990101001

Mahasiswa



Zaki Nazyu Irsali
NRP. 5022211014

(halaman ini sengaja di kosongkan)

ABSTRAK

ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DAN PELEPASAN BEBAN PADA PT. PERTAMINA REFINERY UNIT (RU) VI BALONGAN AKIBAT RENCANA INTEGRASI DAYA PLN

Nama Mahasiswa / NRP : Zaki Nazyu Irsali / 5022211014
Departemen : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

Abstrak

PT. Pertamina RU-VI Balongan merupakan salah satu dari tujuh *Refinery Unit* yang kegiatan bisnis utamanya adalah mengolah minyak mentah menjadi BBM (Bahan Bakar Minyak), non-BBM, dan kebutuhan petrokimia lainnya. Sistem kelistrikan di PT. Pertamina RU-VI Balongan memiliki sistem yang sangat kompleks. Perubahan demi perubahan dilakukan demi meningkatkan keandalan sistem ketika terjadi gangguan. Untuk menjaga kestabilan dan kontinuitas sistem kelistrikan guna memenuhi kebutuhan daya beban, PT. Pertamina RU-VI Balongan ditunjang dengan 5-unit pembangkit *Steam Turbin Generator* (STG). Demi meningkatkan keandalan pasokan listrik agar produksi minyak di PT. Pertamina RU-Balongan tetap terjaga dan semakin naik, maka PT. Pertamina RU-Balongan melakukan integrasi daya bersama PLN. Hal ini menimbulkan beberapa permasalahan baru salah satunya kestabilan transien pada sistem jaringan kelistrikannya. Sehingga pada tugas akhir ini, akan dilakukan analisis kestabilan transien akibat integrasi daya oleh PLN, kemudian akan dilakukan perancangan mekanisme pelepasan beban (*load shedding*) agar sistem mampu mempertahankan kestabilan dan kontinuitas aliran daya tetap terjaga. Tujuan dilakukannya tugas akhir ini adalah untuk mengetahui lokasi beban yang akan dilepas secara tepat, sehingga dapat memperbaiki frekuensi dan tegangan seefektif mungkin sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37. 106-1987 akibat adanya perubahan sistem yang di integrasi dengan PLN.

Kata kunci: Pelepasan Beban, Stabilitas Transien, Frekuensi, Refinery Unit

(halaman ini sengaja di kosongkan)

ABSTRACT

TRANSIEN STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING AT PT. PERTAMINA REFINERY UNIT (RU) VI BALONGAN DUE TO PLN POWER INTEGRATION PLAN

Student Name / NRP : Zaki Nazyu Irsali / 5022211014
Department : Teknik Elektro FTEIC - ITS
Advisor : 1. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
2. Dr. Ir. Margo Pujiantara, M.T.

Abstract

PT Pertamina RU-VI Balongan is one of the seven Refinery Units whose main business activity is to process crude oil into BBM (Fuel Oil), non-BBM, and other petrochemical needs. The electricity system at PT Pertamina RU-VI Balongan has a very complex system. Change after change is made to improve the reliability of the system when a disturbance occurs. To maintain the stability and continuity of the electricity system to meet load power requirements, PT Pertamina RU-VI Balongan is supported by a 5-unit Steam Turbine Generator (STG). To improve the reliability of electricity supply so that oil production at PT Pertamina RU-Balongan is maintained and increasing, PT Pertamina RU-Balongan integrates power with PLN. This raises several new problems, one of which is transien stability in the electrical network system. So that in this final project, a transien stability analysis will be carried out due to the integration of power by PLN, then a load shedding mechanism will be designed so that the system is able to maintain stability and power flow continuity is maintained. The purpose of this final project is to determine the exact location of the load to be released, to improve the frequency and voltage as effectively as possible in accordance with the ANSI / IEEE C37 standard. 106-1987 due to changes in the system integrated with PLN.

Keywords: *Load shedding, Transien stability, Frequency, Refinery Unit*

(halaman ini sengaja di kosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya yang melimpah, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “**Analisis Kestabilan Transien dan Pelepasan Beban Pada PT. Pertamina Refinery Unit (Ru) Vi Balongan Akibat Rencana Integrasi Daya Pln**” Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis menyadari bahwa penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT dan junjungan kita Nabi Besar Muhammad SAW, atas segala berkah dan rahmat-Nya.
2. Kedua orang tua tercinta, 4 saudara dan nenek saya yang saya sayangi, yang selalu memberikan dukungan moral dan doa untuk keberhasilan penulis.
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT dan Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan bimbingan, saran, dan arahan demi kelancaran penyelesaian tugas akhir penulis.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan ilmu dan bimbingan kepada penulis selama menempuh pendidikan.
5. Azis, Bintang, Cahya, Bagas, Farhan, Fauzan dan Alvin selaku teman seperjuangan kos saya yang telah banyak membantu dan bekerja sama selama dikampus.
6. Abrar, Fadhil, Krishna, Rangga, Jemister, Nalendra, Irgi, Yose, Clairine, Ghazi dan seluruh rekan asisten laboratorium LIPIST Angkatan 2022 yang telah mendukung dalam kelancaran penyusunan tugas akhir penulis
7. Seluruh rekan Angkatan e61 atas kerjasamanya sejak awal perkuliahan hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam penyusunan Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.
9. Penulis berharap tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik, koreksi, dan saran yang bersifat membangun dari pembaca untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juni 2025

Penulis

(halaman ini sengaja di kosongkan)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	3
PERNYATAAN ORISINALITAS	5
ABSTRAK	7
ABSTRACT	9
KATA PENGANTAR	11
DAFTAR ISI	13
DAFTAR GAMBAR	15
DAFTAR TABEL	19
BAB 1 PENDAHULUAN	21
1.1 Latar Belakang	21
1.2 Rumusan Masalah	22
1.3 Batasan Masalah	22
1.4 Tujuan	22
1.5 Manfaat	22
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	24
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu	24
2.2 Dasar Teori	24
2.2.1 Sistem Tenaga Listrik	24
2.2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	25
2.2.3 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga	25
2.2.4 Mode Governor	27
2.2.5 Pelepasan Beban	28
2.2.6 Standar Analisis Kestabilan Transien	29
BAB 3 METODOLOGI	31
3.1 Metode yang digunakan	31
3.1.1 Studi Literatur	31
3.1.2 Pengumpulan Data Sistem Kelistrikan	31
3.1.3 Pemodelan Sistem Kelistrikan Pada <i>Software</i> ETAP	38
3.1.4 Percobaan Simulasi	40
3.1.5 Analisis Hasil Simulasi	40
3.1.6 Penyusunan Buku Tugas Akhir	40
3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan	41
3.3 Urutan pelaksanaan penelitian	41
BAB 4 Hasil dan Pembahasan	42

4.1	Studi Kasus Kestabilan Transien.....	42
4.1.1	Generator Outage	42
4.1.2	Short Circuit	42
4.2	Simulasi Kestabilan Transien.....	42
4.3	Skenario Kestabilan Transien.....	42
4.3.1	Skenario Kasus Kestabilan Transien	43
4.3.2	Pemodelan Skenario Load Shedding	44
4.4	Hasil Simulasi Kestabilan Transien	44
4.4.1	Simulasi kestabilan Transien Generator Outage	45
4.4.2	Simulasi Kestabilan Transien Short Circuit	65
4.5	Rekapitulasi Data	113
4.5.1	Rekapitulasi Respon Frekuensi	113
4.5.2	Rekapitulasi Respon Tegangan	113
4.5.3	Rekapitulasi Respon Trafo PLN	113
4.5.4	Rekapitulasi Kasus Short Circuit	114
BAB 5	Kesimpulan dan Saran.....	115
5.1	Kesimpulan.....	115
5.2	Saran.....	115
	DAFTAR PUSTAKA	117
	LAMPIRAN.....	119
	BIODATA PENULIS	124

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	25
Gambar 2.2 Sudut Rotor Dalam Keadaan Stabil	27
Gambar 2.3 Sudut Rotor Dalam Keadaan Tidak Stabil.....	27
Gambar 2.4 Diagram Konsep Dasar Speed Governor.....	27
Gambar 2.5 Skema Load Shedding menurut IEEE C37. 106-2003	28
Gambar 2.6 Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu	28
Gambar 2.7 Standard Tegangan IEEE Std 1159-2019	29
Gambar 2.8 Standar Batas Operasi Frekuensi Berdasarkan IEEE Std. C37.106-2022	29
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Penelitian.....	31
Gambar 3.2 Trigger Load Shedding berdasarkan status STG.	32
Gambar 3.3 Trigger Load Shedding berdasarkan frekuensi status	32
Gambar 3.4 Data beban yang digunakan pada simulasi load shedding step 1	33
Gambar 3.5 Data beban yang digunakan pada simulasi load shedding step 2	34
Gambar 3.6 Data beban yang digunakan pada simulasi load shedding step 3	34
Gambar 3.7 Data beban yang digunakan pada simulasi load shedding step 4	34
Gambar 3.8 Data beban yang digunakan pada simulasi load shedding step 5	35
Gambar 3.9 Block diagram Woodward 505E.....	37
Gambar 3.10 Single Line Diagram sebelum di Integrasi Daya dengan PLN	39
Gambar 3.11 Single Line Diagram sesudah di Integrasi Daya dengan PLN.....	39
Gambar 3.12 Overview Single Line Diagram ketika di Integrasi dengan PLN	40
Gambar 4.1 Pola Operasi 4 Generator (51-G-101 C OFF): STG E Trip.....	45
Gambar 4.2 Grafik Respon Frekuensi pada pola operasi 4 Generator: STG E Trip	45
Gambar 4.3 Grafik Respon Tegangan pada pola operasi 4 Generator: STG E Trip	46
Gambar 4.4 Grafik Respon Trafo PLN pada pola operasi PLN dan 4 Generator: STG E Trip	47
Gambar 4.5 Respon grafik Daya Mekanik STG lainnya sebelum STG E Trip.....	47
Gambar 4.6 Respon grafik Daya Mekanik STG lainnya sesudah STG E Trip Tanpa Status.	47
Gambar 4.7 Respon grafik daya mekanik STG lainnya sesudah STG Trip dan Status.....	48
Gambar 4.10 Respon grafik daya elektrik STG lainnya sebelum STG E Trip.....	48
Gambar 4.11 Respon grafik daya elektrik STG lainnya sesudah STG E Trip Tanpa LS.....	49
Gambar 4.12 Respon grafik daya elektrik STG lainnya sesudah STG Trip dan LS	49
Gambar 4.15 Respon grafik sudut rotor STG lainnya sebelum STG E Trip	50
Gambar 4.16 Respon grafik sudut rotor STG lainnya sesudah STG E Trip Tanpa Status	50
Gambar 4.17 Respon grafik sudut rotor STG lainnya sesudah STG Trip dan Status	50
Gambar 4.20 Pola Operasi 4 Generator (51-G-101 C OFF): STG E dan D Trip	51
Gambar 4.21 Respon Grafik Frekuensi Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip	52
Gambar 4.22 Respon Grafik Tegangan Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip	53
Gambar 4.23 Respon Trafo PLN pada Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip	53
Gambar 4.24 Respon grafik Daya Mekanik STG lainnya sebelum STG E dan D Trip	54
Gambar 4.25 Respon grafik Daya Mekanik STG lainnya sesudah STG E dan D Trip Tanpa LS	54
Gambar 4.26 Respon grafik daya mekanik STG lainnya sesudah STG Trip dan LS.....	55
Gambar 4.29 Respon grafik daya elektrik STG pada kondisi normal.....	55
Gambar 4.30 Respon grafik daya elektrik STG saat terjadinya STG Trip tanpa LS.....	56

Gambar 4.31	Respon daya elektrik STG lainnya sesudah STG Trip dan LS	56
Gambar 4.34	Respon Sudut Rotor STG lainnya sebelum mengalami STG E dan D Trip	57
Gambar 4.35	Respon Sudut Rotor STG lainnya setelah mengalami STG E dan D Trip tanpa LS	57
Gambar 4.36	Respon Sudut Rotor STG lainnya setelah mengalami STG E dan D Trip dengan LS	57
Gambar 4.39	Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip	58
Gambar 4.40	Respon Frekuensi pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip	59
Gambar 4.41	Respon Tegangan pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip	59
Gambar 4.42	Respon Daya Trafo PLN pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip	60
Gambar 4.43	Respon Daya Mekanik sebelum terjadinya STG E Trip	61
Gambar 4.44	Respon Daya Mekanik setelah terjadinya STG E Trip tanpa LS	61
Gambar 4.46	Respon Daya Mekanik setelah terjadinya STG E Trip dengan LS	61
Gambar 4.48	Respon Daya Elektrik sebelum terjadinya STG E Trip	62
Gambar 4.49	Respon Daya Elektrik setelah terjadinya STG E Trip tanpa LS	62
Gambar 4.51	Respon Daya Elektrik setelah terjadinya STG E Trip dengan LS	63
Gambar 4.53	Respon Sudut Rotor STG Lainnya sebelum STG E Trip	63
Gambar 4.54	Respon Sudut Rotor STG Lainnya setelah STG E trip tanpa LS	64
Gambar 4.56	Respon Sudut Rotor STG Lainnya setelah STG E Trip dengan LS tanpa PLN	64
Gambar 4.84	Respon Frekuensi saat mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV	65
Gambar 4.85	Respon Tegangan saat mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV	66
Gambar 4.86	Respon Daya Mekanik Sebelum mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV	67
Gambar 4.87	Respon Daya Mekanik Setelah mengalami Hubung singkat di Bus 20 kV	67
Gambar 4.88	Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya open CB	67
Gambar 4.89	Respon Daya Elektrik Sebelum mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV	68
Gambar 4.90	Respon Daya Elektrik Setelah mengalami Hubung singkat di Bus 20 kV	69
Gambar 4.91	Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya open CB	69
Gambar 4.92	Respon Sudut Rotor Sebelum mengalami gangguan Hubung Singkat 20 kV	70
Gambar 4.93	Respon Sudut Rotor Setelah mengalami gangguan Hubung Singkat 20 kV	70
Gambar 4.94	Respon Sudut Rotor Setelah dilakukannya open CB	71
Gambar 4.95	Respon Frekuensi ketika mengalami Hubung Singkat 10 kV	71
Gambar 4.96	Respon Frekuensi ketika mengalami Hubung Singkat 10 kV	72
Gambar 4.97	Respon Daya Mekanik sebelum mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV	73
Gambar 4.98	Respon Daya Mekanik setelah mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV	73
Gambar 4.99	Respon Daya Mekanik setelah dilakukannya mitigasi Open CB	74
Gambar 4.100	Respon Daya Elektrik sebelum mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV	75
Gambar 4.101	Respon Daya Elektrik setelah mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV	75
Gambar 4.102	Respon Daya Elektrik setelah dilakukannya mitigasi Open CB	75
Gambar 4.103	Respon Sudut Rotor sebelum mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV	76
Gambar 4.104	Respon Sudut Rotor setelah mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV	77
Gambar 4.105	Respon Sudut Rotor setelah dilakukannya mitigasi Open CB	77

Gambar 4.106	Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV.....	78
Gambar 4.107	Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat 3,15 kV.....	78
Gambar 4.108	Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV .	79
Gambar 4.109	Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV....	80
Gambar 4.110	Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	80
Gambar 4.111	Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV...	81
Gambar 4.112	Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	81
Gambar 4.113	Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB.....	82
Gambar 4.114	Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV.....	83
Gambar 4.115	Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV.....	83
Gambar 4.116	Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	83
Gambar 4.117	Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV.....	84
Gambar 4.118	Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV.....	85
Gambar 4.119	Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV .	86
Gambar 4.120	Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV....	86
Gambar 4.121	Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	86
Gambar 4.122	Respon Daya elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV ...	87
Gambar 4.123	Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	87
Gambar 4.124	Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB.....	87
Gambar 4.125	Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV.....	88
Gambar 4.126	Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV.....	88
Gambar 4.127	Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	89
Gambar 4.128	Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV.....	90
Gambar 4.129	Respon Tegangan ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	91
Gambar 4.130	Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	91
Gambar 4.131	Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV.....	92
Gambar 4.132	Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	92
Gambar 4.133	Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV.....	93
Gambar 4.134	Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	93
Gambar 4.135	Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB.....	93
Gambar 4.136	Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV.....	94
Gambar 4.137	Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	94
Gambar 4.138	Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	95
Gambar 4.139	Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV.....	95
Gambar 4.140	Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV.....	96
Gambar 4.141	Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	97
Gambar 4.142	Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV.....	98
Gambar 4.143	Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	98
Gambar 4.144	Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV.....	99
Gambar 4.145	Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	99
Gambar 4.146	Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigas Open CB.....	99
Gambar 4.147	Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV.....	100
Gambar 4.148	Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	100
Gambar 4.149	Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	101
Gambar 4.150	Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV.....	102
Gambar 4.151	Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV.....	102
Gambar 4.152	Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	103

Gambar 4.153	Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV..	103
Gambar 4.154	Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	104
Gambar 4.155	Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV.	104
Gambar 4.156	Respon Daya Elektrik Sesudah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV .	105
Gambar 4.157	Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB.....	105
Gambar 4. 158	Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV...	106
Gambar 4.159	Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	106
Gambar 4.160	Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	106
Gambar 4.161	Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV.....	107
Gambar 4.162	Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV.....	108
Gambar 4.163	Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	109
Gambar 4.164	Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV..	109
Gambar 4.165	Respon Daya mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB.....	109
Gambar 4.166	Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV.	110
Gambar 4.167	Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV ...	110
Gambar 4.168	Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB.....	111
Gambar 4.169	Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV....	111
Gambar 4.170	Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	112
Gambar 4.171	Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB	112

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Data rincian Generator PT. Pertamina RU VI Balongan sebelum integrasi PLN ...	35
Tabel 3.2	Data rincian Transformator PT. Pertamina RU VI Balongan	36
Tabel 3.3	Data pembangkit dengan operasi 3 generator sebelum beban dialihkan ke PLN ...	36
Tabel 3.4	Data pembangkit dengan operasi 4 generator sebelum beban dialihkan ke PLN ...	36
Tabel 3.5	Data pembangkit dengan operasi 4 generator setelah beban dialihkan ke PLN.....	36
Tabel 3.6	Data pembangkit setelah integrasi dengan PLN 100 % ketika 3 generator aktif	37
Tabel 3.7	Data nilai yang digunakan pada simulasi untuk controller Woodward 505E	37
Tabel 3.8	Data Power Flow pada Trafo.....	38
Tabel 3.9	Jadwal Kegiatan Penelitian.....	41
Tabel 4.1	Pola Operasi Pembangkitan.....	43
Tabel 4.2	Skenario Kasus Kestabilan Transien berupa Generator Outage.....	43
Tabel 4.4	Pemodelan Skenario Load Shedding.....	44
Tabel 4.5	Data Respon Frekuensi pada pola operasi 4 Generator: STG E Trip.....	45
Tabel 4.6	Data Respon Tegangan pada pola operasi 4 Generator: STG E Trip.....	46
Tabel 4.7	Data Respon Trafo PLN pada pola operasi PLN dan 4 Generator: STG E Trip.....	47
Tabel 4.8	Data respon daya mekanik STG lainnya	48
Tabel 4.9	Data respon daya elektrik STG lainnya.....	49
Tabel 4.10	Data respon sudut rotor STG lainnya	50
Tabel 4.11	Data Respon Frekuensi Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip.....	52
Tabel 4.12	Data Respon Tegangan Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip.....	53
Tabel 4.13	Data Respon Trafo PLN pada Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip	54
Tabel 4.14	Respon Daya Mekanik STG lainnya	55
Tabel 4.15	Data Respon Daya Elektrik STG lainnya.....	56
Tabel 4.16	Data Respon Sudut Rotor STG lainnya.....	58
Tabel 4.17	Data Respon Frekuensi pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip	59
Tabel 4.18	Data Respon Tegangan pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip	60
Tabel 4.19	Data Respon Daya Trafo PLN pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip ..	60
Tabel 4.20	Data Respon Daya Mekanik pada STG lainnya	62
Tabel 4.21	Respon Daya Elektrik STG Lainnya	63
Tabel 4.22	Respon Sudut Rotor STG lainnya ketika STG E Trip.....	64
Tabel 4.35	Data Respon Frekuensi saat mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV	65
Tabel 4.36	Data Respon Tegangan mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV.....	66
Tabel 4.37	Data Respon Daya Mekanik lainnya ketika gangguan Hubung singkat di Bus 20 kV	68
Tabel 4.38	Data Respon Daya Elektrik lainnya ketika gangguan Hubung singkat Bus 20 kV	69
Tabel 4.39	Data Respon Sudut Rotor Lainnya ketika mengalami hubung singkat Bus 20 kV	71
Tabel 4.40	Data Respon Frekuensi ketika mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	71
Tabel 4.41	Data Respon Frekuensi ketika mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	72
Tabel 4.42	Data Respon Daya Mekanik STG Lainnya ketika hubung singkat Bus 10 kV	74
Tabel 4.43	Data Respon Daya Elektrik STG Lainnya ketika Hubung Singkat 10 kV	75
Tabel 4.44	Data Respon Sudut Rotor Lainnya ketika Hubung Singkat 10 kV	77
Tabel 4.45	Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat 3,15 kV	78
Tabel 4.46	Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat 3,15 kV	79

Tabel 4.47	Data Respon Daya Mekanik STG ketika Hubung Singkat 3,15 kV	80
Tabel 4.48	Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	82
Tabel 4.49	Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	83
Tabel 4.50	Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	84
Tabel 4.51	Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	85
Tabel 4.52	Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV ...	86
Tabel 4.53	Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	87
Tabel 4.54	Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	89
Tabel 4.55	Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	90
Tabel 4.56	Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	91
Tabel 4.57	Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	92
Tabel 4.58	Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	94
Tabel 4.59	Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV	95
Tabel 4.60	Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	96
Tabel 4.61	Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	97
Tabel 4.62	Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	98
Tabel 4.63	Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	99
Tabel 4.64	Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV	101
Tabel 4.65	Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	102
Tabel 4.66	Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	103
Tabel 4.67	Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV .	104
Tabel 4.68	Data Respon Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	105
Tabel 4.69	Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV	107
Tabel 4.70	Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	108
Tabel 4.71	Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	108
Tabel 4.72	Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV .	110
Tabel 4.73	Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV ..	111
Tabel 4.74	Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV	112
Tabel 4.75	Data Rekapitulasi Respon Frekuensi	113
Tabel 4.76	Data Rekapitulasi Tegangan	113
Tabel 4.77	Data Rekapitulasi Respon Trafo PLN	113
Tabel 4.78	Data Rekapitulasi 4 STG aktif Dalam Kasus Short Circuit	114
Tabel 4.79	Data Rekapitulasi 3 STG aktif Dalam Kasus Short Circuit	114

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia mempunyai potensi minyak mentah (*crude oil*) yang masih bisa digunakan. Seluruh kegiatan dalam pengelolaan dan penggunaan minyak dan juga gas bumi di negara Indonesia dilakukan oleh Perusahaan PT. Pertamina dan harus berjalan sesuai target. Oleh sebab itu, dalam menjalankan prosesnya PT. Pertamina memerlukan perencanaan yang baik terhadap *crude oil* dalam jangka pendek dan jangka panjang. PT. Kilang Pertamina – *Refinery Unit VI* Balongan merupakan kilang keenam dari tujuh kilang Direktorat Pengolahan PT. Pertamina dengan salah satu kegiatan utamanya adalah mengolah *crude oil* menjadi produk-produk Bahan Bakar Minyak (BBM), Non BBM, dan Petrokimia. RU VI Balongan bertujuan untuk penyuplai kebutuhan bahan bakar terutama di ibukota negara dan bagian utara Provinsi Jawa Barat maupun untuk produk ekspor sebagai pemasukan devisa negara dan Pertamina[1].

Sistem kelistrikan merupakan salah satu organ vital yang penting karena sangat berpengaruh langsung terhadap proses produksi kilang. Saat ini sistem kelistrikan kilang Pertamina RU VI Balongan dipasok melalui lima unit *Steam Turbine Generator* (STG). Secara umum, total daya beban listrik pada kilang Pertamina RU VI Balongan sekitar 59 MW. Energi listrik ini disalurkan melalui sistem distribusi utama 20 kV *double-busbar* dengan pola operasi radial. Sistem distribusi primer tersebut diteruskan melalui jaringan distribusi sekunder menggunakan switchgear 3 kV dan 0.4 kV.

Pada Pertamina RU VI Balongan ingin meningkatkan keandalan dalam pengoperasian sistem kelistrikan agar proses produksi dapat meningkat dengan melakukan integrasi daya PLN. Hal ini dilakukan agar dari PT. Pertamina RU VI Balongan mendapatkan pasokan listrik dan juga dapat meningkatkan keandalan pasokan listriknya. Perencanaan integrasi daya oleh PLN ini dapat menyebabkan beberapa gangguan pada sistem awalnya sehingga diperlukan analisis lebih lanjut yaitu salah satunya analisis stabilitas transien agar sistem yang ada pada PT. Pertamina RU VI Balongan tetap terjaga keandalan sistemnya.

Keandalan pengoperasian dalam suatu sistem tenaga listrik adalah hal yang harus dijamin kestabilannya, apalagi untuk sistem kelistrikan dengan skala yang besar yang mencakup lebih dari dua generator dan memasok beban yang sangat banyak dalam waktu yang bersamaan. Apabila kontinuitas daya tidak terpenuhi dalam sebuah sistem kelistrikan, maka dapat menyebabkan kerugian besar[2]. Sebuah sistem dikatakan stabil jika daya mekanik yang dihasilkan oleh penggerak utama generator (*prime mover*) seimbang dengan daya elektrik yang disalurkan ke beban. Nilai daya output elektrik dipengaruhi oleh perubahan dari beban sehingga *prime mover* harus menyeimbangkan daya input mekanik. Apabila *prime mover* tidak mampu menyeimbangkan dengan keadaan beban maka akan mengakibatkan sistem tidak stabil.

Selain dalam meningkatkan keandalan, terdapat kebijakan baru agar pihak dari PT Pertamina RU VI Balongan melakukan integrasi daya bersama PLN untuk meningkatkan efisiensi dan juga dapat mendorong penggunaan energi terbarukan yang lebih besar.

Berdasarkan latar belakang tersebut, pada Tugas Akhir ini akan dilakukan analisis kestabilan transien dan skema pelepasan beban untuk menjaga sistem tetap stabil dan terjaga keandalannya saat terjadinya gangguan. Perencanaan skema pelepasan beban dilakukan sesuai dengan standar dengan mempertimbangkan studi aliran daya dan studi kasus kestabilan transien pada PT. Pertamina RU VI Balongan. Hasil dari analisis tersebut diharapkan dapat digunakan sebagai referensi maupun rekomendasi skema pelepasan beban yang tepat akibat integrasi daya oleh PLN.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana kondisi kestabilan transien pada PT. Pertamina RU-VI Balongan sebelum dan sesudah dilakukannya integrasi daya oleh PLN?
2. Bagaimana respons frekuensi dan tegangan dalam sistem kelistrikan PT. Pertamina RU-VI Balongan selama terjadinya gangguan?
3. Bagaimana rancangan pola mekanisme pelepasan beban (*load shedding*) yang tepat dan handal sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 akibat dilakukan integrasi daya oleh PLN?

1.3 Batasan Masalah

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini diperlukan agar permasalahan yang dibahas terarah, batasan masalah yang diberikan adalah sebagai berikut.

1. Plant yang digunakan adalah sistem kelistrikan PT. Pertamina RU VI Balongan.
2. Beban yang dipindahkan ke PLN tidak termasuk dalam penelitian ini.
3. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk memberikan referensi skema pelepasan beban menggunakan skema status dan menggunakan standar IEEE sebagai backup.
4. Parameter yang akan diamati diantaranya adalah nilai frekuensi dan tegangan.

1.4 Tujuan

Dari rumusan masalah yang telah disebutkan di atas, diharapkan dapat mencapai tujuan seperti berikut :

1. Mengetahui kondisi kestabilan transien pada PT. Pertamina RU-VI Balongan sebelum dan sesudah dilakukannya integrasi daya oleh PLN.
2. Mengetahui respon frekuensi dan tegangan dalam sistem kelistrikan PT. Pertamina RU-VI Balongan selama terjadinya gangguan.
3. Mengetahui rancangan pola mekanisme pelepasan beban (*load shedding*) yang tepat dan handal sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 akibat dilakukan integrasi daya oleh PLN

1.5 Manfaat

Setelah dilakukannya kajian terhadap permasalahan yang ada, diharapkan hasil dari kajian ini memberikan manfaat seperti berikut :

1. Meningkatkan keandalan sistem serta bisa menjadi rujukan dalam melakukan mekanisme pelepasan beban di PT. Pertamina RU-VI Balongan.

2. Mengetahui kondisi kestabilan transien pada PT. Pertamina RU-VI Balongan sebelum dan sesudah dilakukannya integrasi daya oleh PLN.
3. Dapat dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya tentang stabilitas transien dan skema pelepasan beban pada sistem kelistrikan di industri.
4. Mendapatkan rancangan skema pelepasan beban (*load shedding*) yang handal agar sistem dapat mempertahankan keseimbangan saat terjadinya gangguan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Sudah ada beberapa penelitian yang membahas terkait stabilitas transien dan skema pelepasan beban (*load shedding*) yang telah dilakukan sebelumnya. Dari jurnal-jurnal penelitian tersebut, beberapa dijadikan referensi dalam pembuatan tugas akhir ini seperti uraian yang ada berikut ini :

1. Analisis Kestabilan Transien di PT. Petrokimia Gresik Akibat Integrasi Pabrik I, II, III, Unit Batu Bara dan PLN menggunakan SIS oleh **Muhammad Wimas Adhyatma**

Sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik secara umum menggunakan sistem interkoneksi. Sistem ini digunakan untuk meningkatkan keandalan sistem ketika sistem mengalami gangguan. Keunggulan dari sistem interkoneksi ini adalah beberapa pusat pembangkit dapat menyalurkan daya ke beban sehingga memungkinkan beban mendapat suplai lebih dari 1 generator. Pada Thesis ini, sistem kelistrikan PT. Petrokimia Gresik dikembangkan dengan menggunakan sistem distribusi ring sehingga diharapkan keandalan sistem semakin meningkat ketika sistem mengalami gangguan besar secara tiba-tiba. Beberapa studi kasus yang dibahas diantaranya adalah diasumsikan terdapat 1 atau 2 generator lepas dari sistem ketika sedang berjalan dengan asumsi bahwa pembangkit PLN *off*. Lalu *starting motor* dengan ID MC-1301 ketika motor dalam keadaan *off* dengan asumsi motor beroperasi sesaat setelah sistem berjalan [3].

2. Analisis Kestabilan Transien dan Pelepasan Beban Pada Sistem Integrasi 33 KV PT. Pertamina RU IV Cilacap akibat Penambahan Beban RFCC dan PLBC oleh **Firdaus Ariansyah, Ardyono Priyadi, dan Margo Pujiantara**

Adanya penambahan beban pada sistem kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap mengakibatkan penambahan pembangkit dan pabrik baru, sehingga industri ini perlu menambahkan sistem bus 33 KV. Pada jurnal ini, telah berhasil menganalisis kestabilan transien yang lebih optimal dengan melakukan metode pelepasan beban pada PT Pertamina RU IV Cilacap setelah di integrasi dengan PLN 150 KV dengan menggunakan 11 studi kasus generator trip [4].

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik telah beroperasi selama sekitar 100 tahun terakhir dengan menggunakan prinsip-prinsip dasar yang sama. Seperti yang diketahui, sistem tenaga listrik dibagi menjadi beberapa bagian yaitu mulai dari pembangkit, jalur transmisi, jalur distribusi, dan juga konsumen / beban. Dan ada ketentuan dalam sistem tenaga listrik ini bahwa pada setiap jumlah nilai daya yang dihasilkan harus sama dengan daya yang diserap oleh beban [5].

Sistem tenaga listrik pada sebuah plant industry maupun pabrik memiliki infrastruktur yang kompleks dan memiliki peran penting agar proses produksi dapat berjalan dengan baik. Pentingnya keandalan pasokan energi listrik dalam sebuah industry juga bisa dilihat dalam adanya sistem cadangan daya dan sistem darurat. Dengan menggunakan generator listrik darurat, pabrik dapat tetap beroperasi saat terjadinya pemadaman listrik. Hal ini dilakukan untuk mencegah kerugian yang disebabkan adanya gangguan selama proses produksi yang

tidak direncanakan. Secara keseluruhan, sistem tenaga listrik pada sebuah industri maupun pabrik sangat penting untuk tetap menjaga kontinuitas dan menjaga kelancaran operasional. Dengan energi pasokan yang handal, sebuah industri dapat mencapai produktivitas yang tinggi dan dapat menghindari kerugian yang disebabkan oleh pemadaman listrik yang tidak direncanakan.

2.2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk dapat mempertahankan kondisi seimbangnya selama gangguan atau dapat kembali kedalam keadaan seimbangnya setelah mengalami gangguan dengan sebagian besar variable sistem dibatasi sehingga hampir seluruh sistem tetap utuh [6].

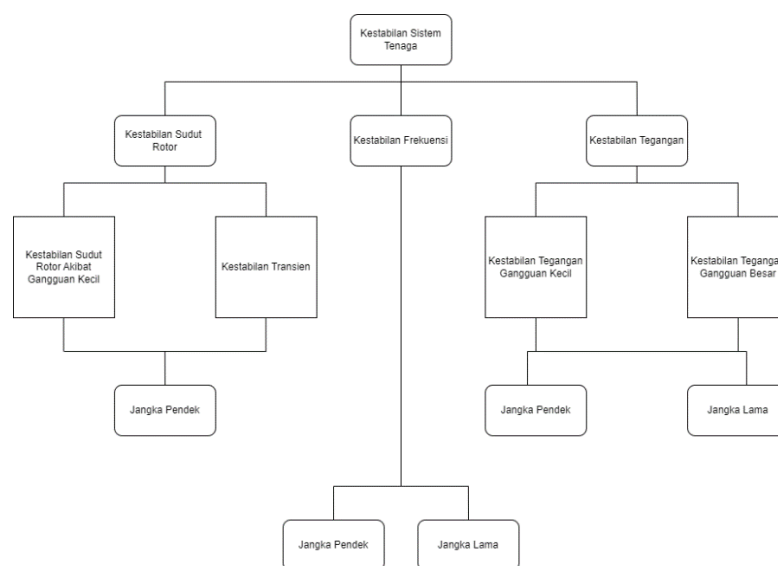
Sebuah sistem kelistrikan yang kompleks biasanya memiliki banyak beban dinamis dengan daya yang sangat bervariasi dalam rentang waktu tertentu. Beban dinamis sistem kelistrikan akan berubah-ubah setiap detiknya, sehingga menyebabkan pasokan daya yang disalurkan oleh pembangkit atau generator harus selalu diperhatikan agar bisa selalu menyesuaikan dengan kebutuhan beban. Suatu sistem dikatakan baik, haruslah memenuhi beberapa syarat berikut ini :

1. *Reliability*
Merupakan kemampuan sebuah sistem untuk mengalirkan daya tanpa henti.
2. *Quality*
Merupakan kemampuan sebuah sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
3. *Stability*
Merupakan kemampuan sistem untuk kembali dalam keadaan normal setelah mengalami gangguan.

Secara keseluruhan, stabilitas sistem tenaga listrik mengacu pada kemampuan sebuah sistem untuk tetap bisa menjaga keadaan sinkronnya baik sebelum, saat, dan setelah terjadinya gangguan [7].

2.2.3 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

Dikutip dari Paper IEEE yang berjudul *Definition and Classification of Power System Stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori, yaitu :



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Ada 3 macam kestabilan sistem tenaga :

a. Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan dibagi menjadi dua, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar. Kestabilan tegangan gangguan kecil yaitu kemampuan untuk mempertahankan tegangan sistem tenaga listrik ketika terjadi gangguan kecil seperti terjadi perubahan beban kecil. Kestabilan tegangan gangguan kecil digunakan sebagai evaluasi tegangan sistem merespon perubahan kecil beban listrik. Gangguan jangka pendek mengakibatkan kedip tegangan (*voltage sags*) dan kenaikan tegangan (*voltage swells*). Gangguan jangka panjang mengakibatkan *overvoltage* dan *undervoltage* [6].

Tegangan adalah parameter penting dalam sebuah kestabilan, karena secara langsung tegangan dapat mempengaruhi kinerja berbagai komponen peralatan listrik terutama pada generator dan beban [8].

Dalam sebuah sistem yang kompleks, untuk tetap menjaga kestabilan sebuah sistem tegangan dari semua bus setelah mengalami gangguan harus tetap bisa bertahan dan bekerja secara optimal atau dapat pulih dan beroperasi secara normal kembali setelah gangguan. Masalah stabilitas tegangan ini merupakan hasil dari efek gabungan antara nilai daya reaktif dan daya aktif [9].

b. Kestabilan Frekuensi

Stabilitas frekuensi mengacu pada kemampuan sebuah sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi tetap stabil di saat mengalami gangguan maupun setelah mengalami gangguan sistem yang parah yang dapat mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Secara umum, masalah stabilitas frekuensi dikaitkan dengan cadangan pembangkitan yang tidak mencukupi dan perhitungan pelepasan beban yang tidak memadai [10].

Kestabilan frekuensi dibagi menjadi dua, yaitu jangka pendek dan jangka panjang. Contoh kestabilan frekuensi jangka pendek adalah ketika terjadi kekurangan daya pembangkitan atau ketika beban tidak dilepaskan saat sistem mengalami beban berlebih. Sementara itu, contoh kestabilan frekuensi jangka panjang adalah percepatan yang berlebih atau *overspeed* pada turbin uap karena governor tidak bekerja dengan baik [6].

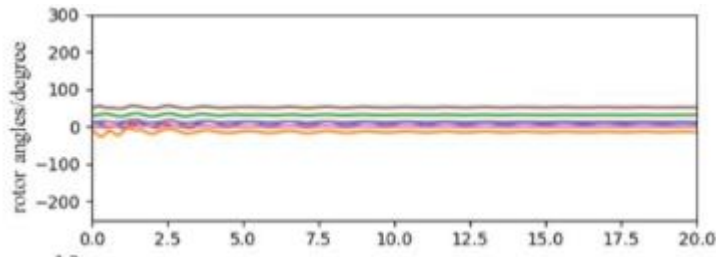
c. Kestabilan Sudut Rotor

Untuk sistem daya yang saling terhubung, stabilitas sudut rotor mengacu pada sebuah kemampuan mesin sinkron untuk tetap dalam posisi sinkron di saat mengalami gangguan atau kembali ke dalam keadaan sinkron setelah mengalami gangguan. Menurut jenis kejadiannya, stabilitas sudut rotor dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu gangguan kecil dan gangguan transien [11].

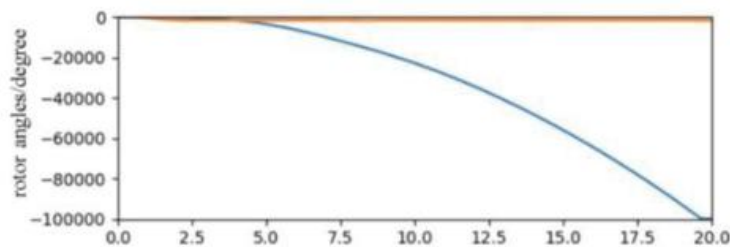
Studi stabilitas gangguan transien umumnya dilakukan dalam rentang waktu 3-5 detik setelah terjadinya gangguan. Pada sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan, rentang waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik. Sementara itu gangguan kecil dilakukan dalam rentang waktu 10-20 detik setelah terjadinya gangguan dan bergantung pada kondisi operasi awal sistem [12].

Dikutip dari buku "*Transien Rotor Angle and Voltage Stability Discrimination Based on Deep Convolutional Neural Network with Multiple*

Inputs” berikut contoh keadaan stabil dan keadaan saat terjadi gangguan transien.



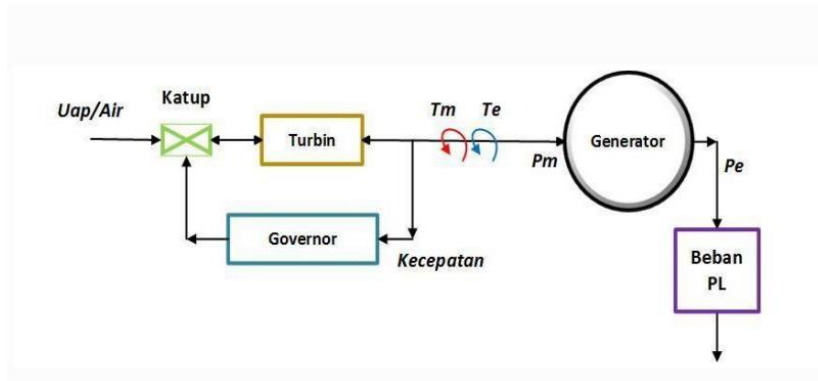
Gambar 2.2 Sudut Rotor Dalam Keadaan Stabil



Gambar 2.3 Sudut Rotor Dalam Keadaan Tidak Stabil

2.2.4 Mode Governor

Konsep dasar kerja pada *speed* governor di ilustrasikan pada gambar berikut yang dikutip dari jurnal yang berjudul “*Analisis Stabilitas Transien Tegangan dan Frekuensi pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap*”



Gambar 2.4 Diagram Konsep Dasar Speed Governor

Saat terjadinya perubahan beban menyebabkan perbedaan antara torsi mekanik dan torsi elektrik yang menyebabkan perbedaan kecepatan. Governor akan mengontrol bahan bakar sesuai dengan keadaan frekuensinya, ketika frekuensi naik governor akan mengurangi kapasitas bahan bakar melalui katup dan ketika frekuensi turun governor akan menambahkan kapasitas bahan bakar.

Terdapat dua mode operasi *speed* governor yaitu mode *droop* dan mode *isochronus*. Mode *droop* sudah memiliki set point daya mekanik yang besarnya sesuai dengan rating generator. Dengan adanya *fixed setting*, nilai daya listrik yang dihasilkan generator akan tetap sehingga perubahan beban tidak mempengaruhi putaran turbin. Pada mode *isochronus* set point putaran governor ditentukan berdasarkan kebutuhan daya pada saat secara *real time*. Governor akan menyesuaikan nilai output daya mekanik turbin agar sesuai dengan kebutuhan daya listrik. Caranya dengan mengatur governor berdasarkan logic control dari pabrikan generator. Mode

ini dapat menjaga frekuensi sistem tetap berada dalam batas yang diijinkan sehingga generator tidak mengalami *loss of synchronization* [13].

2.2.5 Pelepasan Beban

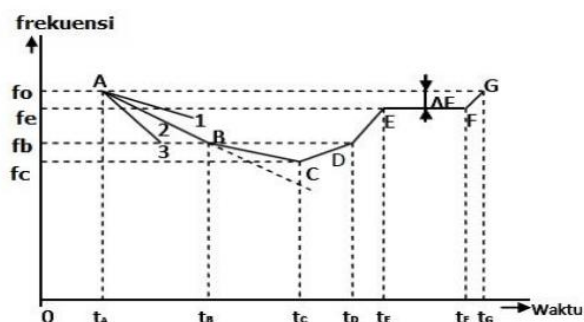
Pelepasan beban atau *load shedding* merupakan salah satu cara untuk mengatasi dan mempertahankan kestabilan jika terjadinya sebuah gangguan pada sistem. Jika terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan nilai suplai daya yang dihasilkan pembangkit lebih kecil dari nilai kebutuhan bebannya, misalnya diakibatkan karena adanya pembangkit yang lepas (*trip*), atau juga disebabkan *prime mover generator* melambat karena memikul beban yang melebihi dari kapasitas. Apabila hal ini tidak segera diatasi, maka akan menimbulkan turunnya frekuensi sistem diluar dari standard yang diizinkan [14].

Pelepasan beban dilakukan berdasarkan standard ANSI IEEE C37.106-1987 seperti berikut.

Step	Frequency Trip Point (Hz)	Frequency Trip Point (%)	Percent Load Shedding (%)	Fixed Time Delay (cycle) on Relay	Fixed Time Delay (second) on Relay
1	59,9	98,83	10	6	0,1
2	58,9	98,17	15	6	0,1
3	58,5	97,5	As Recuired to arrest decline before 58,2Hz/97%		

Gambar 2.5 Skema Load Shedding menurut IEEE C37. 106-1987

Pada Gambar 2.5 menjelaskan langkah pelepasan beban untuk standard frekuensi normal di 60 Hz, yaitu dengan cara melakukan step pelepasan beban maksimal di frekuensi 58,2 Hz dengan time delay pada relay 0,1 detik, dengan total beban yang telah ditentukan pada table diatas. Proses pelepasan beban ini dapat dilihat pada gambar 2.6 dibawah ini.



Gambar 2.6 Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu

Gambar 2.6 menjelaskan tentang hubungan frekuensi sebagai fungsi waktu terhadap pelepasan beban. Misalkan garis 2, frekuensi menurun dengan sangat cepat ke titik B sehingga dilakukan pelepasan beban pertama oleh *Under frequency Relay*. Dengan dilakukannya pelepasan beban maka penurunan frekuensi semakin melambat hingga di titik C. Setelah itu dilakukan kembali pelepasan beban kedua, sehingga frekuensi tidak turun melainkan kembali naik menuju titik D. Naiknya frekuensi dari titik C ke titik D disebabkan oleh adanya daya yang masih tersedia dalam sistem lebih besar daripada beban setelah mengalami pelepasan beban

tingkat kedua. Dan selanjutnya dilakukan pelepasan beban tahap tiga sehingga frekuensi pada sistem mulai kembali dalam keadaan normal [15].

2.2.6 Standar Analisis Kestabilan Transien

Respon tegangan dan frekuensi memiliki peranan yang sangat penting dalam menentukan suatu sistem kestabilan tenaga listrik. Dalam hal ini, ada beberapa standard yang digunakan untuk menentukan kestabilan sistem tenaga listrik yaitu :

a. Standard Tegangan

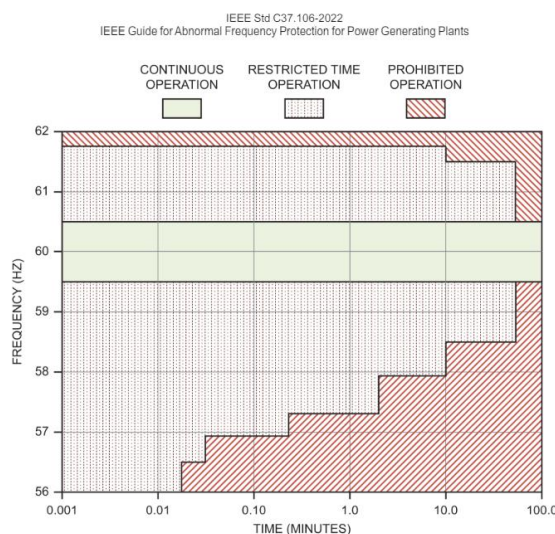
Categories	Typical spectral content	Typical duration	Typical voltage magnitude
1.0 Transients			
1.1 Impulsive			
1.1.1 Nanosecond	5 ns rise	< 50 ns	
1.1.2 Microsecond	1 μ s rise	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Millisecond	0.1 ms rise	> 1 ms	
1.2 Oscillatory			
1.2.1 Low frequency	< 5 kHz	0.3–50 ms	0–4 pu ^a
1.2.2 Medium frequency	5–500 kHz	20 μ s	0–8 pu
1.2.3 High frequency	0.5–5 MHz	5 μ s	0–4 pu
2.0 Short-duration root-mean-square (rms) variations			
2.1 Instantaneous			
2.1.1 Sag		0.5–30 cycles	0.1–0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5–30 cycles	1.1–1.8 pu
2.2 Momentary			
2.2.1 Interruption		0.5 cycles – 3s	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 cycles – 3 s	0.1–0.9 pu
2.2.3 Swell		30 cycles – 3 s	1.1–1.4 pu
2.2.4 Voltage Imbalance		30 cycles – 3 s	2%–15%
2.3 Temporary			
2.3.1 Interruption		>3 s – 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		>3 s – 1 min	0.1–0.9 pu
2.3.3 Swell		>3 s – 1 min	1.1–1.2 pu
2.3.4 Voltage Imbalance		>3 s – 1 min	2%–15%
3.0 Long duration rms variations			
3.1 Interruption, sustained		> 1 min	0.0 pu
3.2 Undervoltages		> 1 min	0.8–0.9 pu
3.3 Overvoltages		> 1 min	1.1–1.2 pu
3.4 Current overload		> 1 min	

Gambar 2.7 Standard Tegangan IEEE Std 1159-2019

Berdasarkan IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, 2019, standar yang digunakan untuk kedip tegangan dengan batas yang diperbolehkan yaitu untuk instantaneous selama 0.5-30 cycle, untuk momentary 30 cycle hingga 3s, sedangkan untuk temporary 3s hingga 1 menit [16].

b. Standard Frekuensi

Standard yang digunakan untuk menentukan operasi frekuensi yang diizinkan pada steam turbin generator adalah ANSI/IEEE Std. C37.102-2003 menggunakan frekuensi 60 Hz.



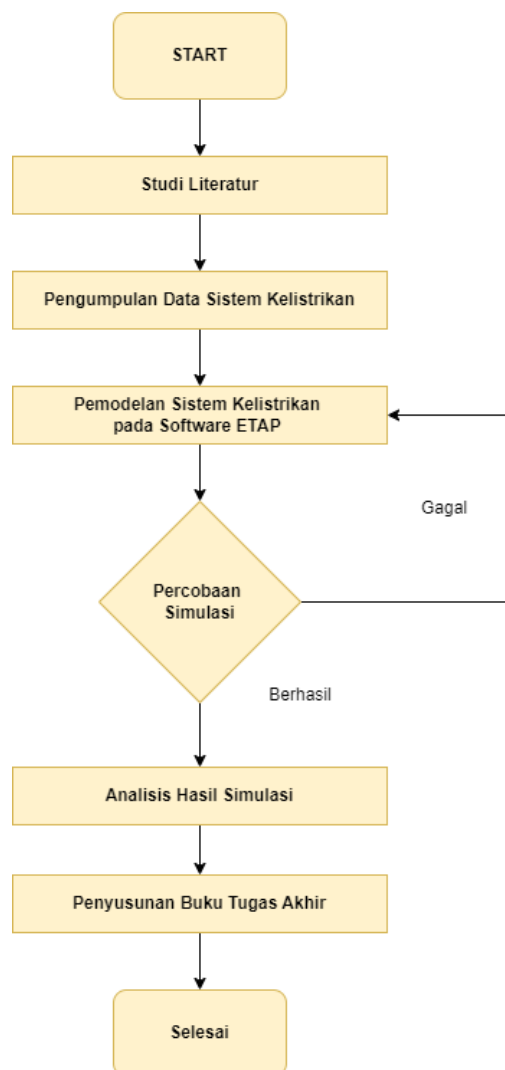
Gambar 2.8 Standar Batas Operasi Frekuensi Berdasarkan IEEE Std. C37.102-2003

Terdapat tiga daerah operasi, yaitu *Restrictive Operation*, *Continuous Operation*, dan *Prohibited Operation*. *Restricted time operating frequency limits* merupakan daerah frekuensi yang masih diizinkan, tetapi hanya bersifat sementara (tergantung besar frekuensi dan waktu). Semakin besar penurunan frekuensinya, maka semakin pendek waktu yang diijinkan frekuensi pada kondisi tersebut. *Continuous operation* merupakan daerah frekuensi normal. *Prohibited operation* merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga frekuensi tidak diijinkan mencapai daerah tersebut [17].

BAB 3 METODOLOGI

3.1 Metode yang digunakan

Dalam melakukan penelitian Analisis Kestabilan Transien, maka dibutuhkan metode untuk mempermudah dalam menyelesaikan penelitian dan penyusunan laporan tugas akhir. Pada bab ini akan dijelaskan tentang proses pengerjaan tugas akhir dari awal hingga akhir. Adapun tahapan-tahapan lebih lengkapnya yang dijelaskan pada *flow chart* pada gambar dibawah ini :



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Penelitian

3.1.1 Studi Literatur

Mempelajari dan memahami teori serta konsep mengenai transien *load shedding* yang berhubungan dengan permasalahan yang ada pada PT. Pertamina RU VI Balongan dengan mengumpulkan referensi seperti buku, paper, dan jurnal yang mengandung informasi berkaitan seperti proteksi sistem tenaga listrik, studi kestabilan transien, dan skema pelepasan beban.

3.1.2 Pengumpulan Data Sistem Kelistrikan

Kegiatan ini, yaitu bertujuan untuk menghimpun data yang diperlukan untuk melakukan penelitian. Data yang dikumpulkan merupakan data yang berkaitan dengan sistem kelistrikan

pada PT. Pertamina RU VI Balongan, seperti spesifikasi dari masing-masing peralatan dan beban yang digunakan pada sistem tenaga listrik. Selain itu, data prioritas beban, single line diagram, skema operasi sistem tenaga listrik juga sangat dibutuhkan untuk menunjang kebutuhan penelitian.

Penambahan daya PLN ketika dilakukan integrasi daya itu sebesar 30 MVA dengan nilai tegangan sebesar 150 kV yang dihubungkan dengan trafo daya sebesar 35 MVA. Generator yang bekerja sebelum di integrasikan dengan pln berjumlah 5 generator dengan 4 generator STG 51-G-101 A, B, C, dan D dan generator STG 51-G-101 E sebagai referensi. sedangkan ketika ingin di integrasikan dengan pln jumlah generator yang bekerja berkisar 2-3 generator.

Akan tetapi skenario simulasi transien stability sebelumnya mengacu pada data dan asumsi yang sudah diuraikan yaitu diantaranya total daya pada sistem 59 MW, jumlah STG minimum yang beroperasi adalah 3 unit, gangguan kestabilan yang disimulasikan berupa accidental tripping STG yang beroperasi dan mengacu pada kestabilan frekuensi dan tegangan , yang kemudian akan ditentukan besaran load shedding yang diperlukan.

PT. Pertamina RU VI Balongan telah menyerahkan skema load shedding terkini. Kejadian load shedding dipicu (trigger) melalui beberapa kondisi sebagai berikut:

1. Status STG Trip

LOAD SHEDDING TABLE
(AFTER TBO 2020)




No.	SS No.	UNIT	LOAD @100%	1 st STEP	2 nd STEP	3 rd STEP	4 th STEP	5 th STEP
II	STG Running 5 STGs Run	1 STG TRIP						
		2 STGs TRIP		<63 MW				
		3 STGs TRIP				<42 MW		
		4 STGs TRIP						<21 MW
	4 STGs Run	1 STG TRIP		<63 MW				
		2 STGs TRIP				<42 MW		
		3 STGs TRIP						<21 MW
	3 STGs Run	1 STG TRIP				<42 MW		
		2 STGs TRIP						<21 MW

Gambar 3.2 Trigger Load Shedding berdasarkan status STG.

2. Frequency status

LOAD SHEDDING TABLE
(AFTER TBO 2020)




No.	SS No.	UNIT	LOAD @100%	1 st STEP	2 nd STEP	3 rd STEP	4 th STEP	5 th STEP
IV	Frequency	48 Hz				48 Hz		
		47.5 Hz						47.5 Hz

Gambar 3.3 Trigger Load Shedding berdasarkan frekuensi status

Data Beban yang digunakan pada simulasi *load shedding eksisting*

Step 1					
UNIT	ID	Rating (kW)	Actual Load (kW)	CB ID	Notes
UTILITY + NEW EWTP	59-A-101A-K1	280	218	CB3	
UTILITY + NEW EWTP	52-B-101F	410	321	CB5	SUBSTITUTE FOR NEW EWTP
UTILITY + NEW EWTP	LUMP FO-PTR2-01	360	279	CB9	SUBSTITUTE FOR NEW EWTP
UTILITY + NEW EWTP	01-PMC3-01A	349	174	01PSW301A	SUBSTITUTE FOR NEW EWTP
UTILITY + NEW EWTP	01-PMC3-01B	237	306	01PSW301B	SUBSTITUTE FOR NEW EWTP
UTILITY + NEW EWTP	01-PMC3-02A	819	549	01PSW302A	SUBSTITUTE FOR NEW EWTP
UTILITY + NEW EWTP	01-PMC3-02B	355	118	01PSW302B	SUBSTITUTE FOR NEW EWTP
12-K-501 B/C	12-K-501C-M	5700	2094	12PTR501C-CB	
GO/LCO	21-K-101A	1500	1070	CB6	
GO/LCO	14-P-101B	960	517	CB10	
GO/LCO	14-K-102B	960	517	CB13	
GO/LCO	14-P-105B	132	74	CB12	
GO/LCO	21-K-101B	1500	80	CB14	
GO/LCO	21-P-102B	425	231	CB16	
GO/LCO	14-K-102A	960	69	CB17	
ARHDM	13-P-101	2050	1518	CB18	
NPU	33-F-101	1473	208	17PSW301A2	
NPU	33-P-101 A	487	9	CB19	
NPU	33-P-112 A	500	92	CB20	
NPU	32-K-102B	2200	1174	CB21	
NPU	17-PMC3-01A	833	322	17PSW301A	
NPU	17-PMC3-02A	890	367	17PSW302A	
OFFSITE (SS No. 21)	42-P-104B	310	225	CB22	
OFFSITE (SS No. 21)	42-P-105B	140	104	CB23	
OFFSITE (SS No. 21)	42-P-203B	150	55	CB24	
OFFSITE (SS No. 21)	42-P-105A	140	52	CB25	
OFFSITE (SS No. 21)	21-PMC3-01A	396	96	21PSW301A	
OFFSITE (SS No. 21)	21-PMC3-01B	492	137	21PSW301B	
OFFSITE (SS No. 21)	21-PMC3-02	36.66	4	21PSW301A	
OFFSITE (SS No. 22)	42-P-301 A	450	174	CB26	
OFFSITE (SS No. 22)	42-P-302 A	380	148	CB27	
OFFSITE (SS No. 22)	42-P-305	350	136	CB28	
OFFSITE (SS No. 22)	42-P-301C	450	311	CB29	

Step 1					
UNIT	ID	Rating (kW)	Actual Load (kW)	CB ID	Notes
OFFSITE (SS No. 22)	22-PMC3-01A	620	454	22PSW301A	
OFFSITE (SS No. 22)	22-PMC3-01B	481	152	22PSW301B	
OFFSITE (SS No. 22)	22-PMC3-02	24.25	4	22PSW301A	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-101A	340	247	CB69	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-204A	185	64	CB70	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-204C	185	13	CB71	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-206A	132	10	CB72	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-101B	340	31	CB73	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-204B	185	85	CB74	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-206B	132	12	CB75	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-404C	250	19	CB76	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-104D	250	19	CB77	
OFFSITE (SS No. 23)	23-PMC3-01A	563	179	23PSW301A	
MSS 31	Housing 1	637	551	31PSW101A	
MSS 32	Housing 2	637	551	31PSW101B	
MSS 33	38-K-101A	450	172	CB32	TAMBAHAN DARI SS 18

Gambar 3.4 Data beban yang digunakan pada simulasi *load shedding* step 1

Owner:	Consultant:	Document Title:	Document Type:
	ITS TEKNO SAINS	STUDI PELEPASAN BEBAN (LOAD SHEDDING) PT. PERTAMINA RU VI BALONGAN	FINAL REPORT

Step 2					
UNIT	ID	Rating (kW)	Actual Load (kW)	CB ID	Notes
UTILITY	56-K-101F	149	111	CB33	
UTILITY	56-K-102F	149	11	CB34	
UTILITY	01-PMC3-03A	486	145	01PSW303A	
RCC (16-20)	14A-PMC3-03A	290	86	14APSW303A	
RCC (16-20)	14A-PMC3-03B	304	127	14APSW303B	
RCC (16-20)	14A-PMC3-04	272	7	14APSW303A	
RCC (16-20)	14A-PMC3-01A	697	216	14APSW301A	
CDU	11-K-102	210	150	CB35	
NPU/31	31-P-101B	900	67	CB36	
NPU/32	17-PMC3-01B	559	461	17PSW301B	
NPU/33	17-PMC3-03	106	91	17-PSW3-03	
OCU	18-PMC3-01A	1064	780	18-PSW3-01A	
OCU	18-PMC3-01B	915	671	18-PSW3-01B	
OCU	18-PMC3-02A	1640	1566	18-PSW3-301A	
OCU	18-PMC3-02B	11	1143	18-PSW3-301B	
OCU	18-PMC3-03	60	108	CB303	
UTILITY (OSBL)	19-PMC3-01A LOAD		353	19-PSW-01A	
UTILITY (OSBL)	059-A-101A-K1	950	738	CB37	
UTILITY (OSBL)	19-PMC3-03 LOAD		57	19-PSW3-302A	
OFFSITE (SS No. 22)	42-P-205A	220	161	CB38	
OFFSITE (SS No. 22)	42-P-303A	410	157	CB39	
OFFSITE (SS No. 23)	37-P-102A	170	125	CB40	

Gambar 3.5 Data beban yang digunakan pada simulasi *load shedding* step 2

Owner:	Consultant:	Document Title:	Document Type:
	ITS TEKNO SAINS	STUDI PELEPASAN BEBAN (LOAD SHEDDING) PT. PERTAMINA RU VI BALONGAN	FINAL REPORT

Step 3					
UNIT	ID	Rating (kW)	Actual Load (kW)	CB ID	Notes
12-K-501 A/B	12-K-501B	5700	1977	12PTR501B-CB	
12-K-501 A/B	12-P-101	2050	1543	CB79	DARI UNIT ARHDM
ARHDM	13-PMC3-01A	158	133	13PSW301A	
ARHDM	13-PMC3-01B	384	189	13PSW301B	
ARHDM	13-PMC3-02	231	73	13PSW301A	
ARHDM	12-P-501A	180	122	CB80	
ARHDM	12-P-505A	450	348	CB81	
ARHDM	12-P-511A	132	93	CB82	
ARHDM	12-K-502B	266	13	CB98	
ARHDM	12-P-101A	2050	153	CB99	
ARHDM	12-P-501B	180	12	CB100	
ARHDM	12-P-511B	132	9	CB101	
ARHDM	12-K-502A	265	127	CB78	
ARHDM	37-P-101A	270	204	CB43	
ARHDM	35-P-102A	180	116	CB44	
CDU	SEMUA		3067	15PSW201A + 15PSW201B	DIKURANGI 11-K-201 (LS STEP 2)
CDU	14A-PMC3-01B	530	311	14APSW301B	DARI RCC(16-20)
CDU	14A-PMC3-02B	410	129	14APSW302B	DARI RCC(16-20)

Gambar 3.6 Data beban yang digunakan pada simulasi *load shedding* step 3

Owner:	Consultant:	Document Title:	Document Type:
	ITS TEKNO SAINS	STUDI PELEPASAN BEBAN (LOAD SHEDDING) PT. PERTAMINA RU VI BALONGAN	FINAL REPORT

Step 4					
UNIT	ID	Rating (kW)	Actual Load (MW)	CB ID	Notes
UTILITY	56-K-102 A/B/C/D/E	745	555	CB 45, CB 46, CB 47, CB 48, CB 49	
NPU	31-K-101 A	420	299	CB50	
NPU	31-P-101 A	900	668	CB51	
NPU	17-PMC3-02B	727	700	17PSW302B	
NPU	32-K-102 A	2200	1558	CB52	
NPU	42-P-304A	1260	449	CB23A1	DARI SS NO. 23
NPU	42-P-404E	250	189	CB53	DARI SS NO. 23
NPU	42-P-101C	250	189	CB54	DARI SS NO. 23
NPU	42-P-404D	250	189	CB55	DARI SS NO. 23
OFFSITE (SS No. 22)	42-P-205B	220	161	CB56	

Gambar 3.7 Data beban yang digunakan pada simulasi *load shedding* step 4

Owner:	Consultant:	Document Title:	Document Type:
	ITS TEKNO SAINS	STUDI PELEPASAN BEBAN (LOAD SHEDDING) PT. PERTAMINA RU VI BALONGAN	FINAL REPORT

Step 5					
UNIT	ID	Rating (kW)	Actual Load (kW)	CB ID	Notes
UTILITY	56-P-101G	1150	898	CB57	
UTILITY	57-P-401A	180	133	CB58	
UTILITY	56-P-101C	1100	784	CB59	
H2	22-K-101A	1950	1351	CB83	
H2	22-K-102	332	239	CB84	
H2	22-K-103	489	349	CB85	
H2	22-P-102A	425	314	CB86	
H2	22-K-101B	1950	1043	CB87	
H2	22-K-101C	1950	89	CB88	
H2	22-P-102B	425	24	CB89	
H2	11-PMC3-01A	138	87	11PSW301A	
H2	11-PMC3-01B	249	131	11PSW301B	
H2	11-PMC3-02	66	7	11PSW301A	
RCC(16-20)	16-K-102B	1220	655	CB62	
RCC(16-20)	16-P-104B	185	103	CB63	
RCC(16-20)	16-P-108B	185	103	CB64	
RCC(16-20)	16-P-110B	185	103	CB65	
RCC(16-20)	19-P-102B	185	10	CB66	
AMINE/SWS/SRU/Na	WS-PTR2-01	985	226	WSPTR201-CB	
AMINE/SWS/SRU/Na	16-PMC3-01B	395	261	16PSW301B	
NPU	32-K-102C	2200	135	CB67	
UTILITY (OSBL)	052-P-101C	500	38	CB90	
UTILITY (OSBL)	056-K-101A1	150	115	CB91	
UTILITY (OSBL)	056-K-101A2	150	115	CB92	
UTILITY (OSBL)	056-K-101A3	150	11	CB93	
UTILITY (OSBL)	056-P-101A	1325	1025	CB94	
UTILITY (OSBL)	058-K-101A	484	348	CB95	
UTILITY (OSBL)	059-A-101B-K1	950	74	CB96	
OFFSITE (SS No. 23)	42-P-303B	410	314	CB97	

Gambar 3.8 Data beban yang digunakan pada simulasi *load shedding* step 5

PT. Pertamina RU VI Balongan memiliki 5 Steam Turbine Generator (STG) utama dengan kapasitas masing-masing 27.5 MVA pada tegangan 10 kV. Selain itu plant juga mempunyai sebuah Emergency Diesel Engine Generator (ED) dengan kapasitas 4.5 MVA pada tegangan 3.15 kV. Berikut rincian table dari data generator dan transformator yang digunakan.

Tabel 3.1 Data rincian Generator PT. Pertamina RU VI Balongan sebelum integrasi PLN

No.	Trafo	Kapasitas (MVA)	Tegangan (kV)	Reaktansi (%)			X/R Ratio
				X''d	X'd	Xd	
1	51-G-101 A	27.5	10	14	17	172	39,44
2	51-G-101 B	27.5	10	14	17	172	39,44
3	51-G-101 C	27.5	10	14	17	172	39,44
4	51-G-101 D	27.5	10	14	17	172	39,44
5	51-G-101 E	27.5	10	16,6	19,6	173	32,629
6	51-G-102	4,5	3,15	13,7	23,7	196	54,8
7	PLN	30	150	-			2

Tabel 3.2 Data rincian Transformator PT. Pertamina RU VI Balongan

No.	Trafo	Kapasitas (MVA)	Tegangan (kV)	Impedance			X/R Ratio
				%Z	%X	%R	
1	51-PTR-101 A	27.5	10/20	9,22	9,212	0,389	23,7
2	51-PTR-101 B	27.5	10/20	9,19	9,182	0,387	23,7
3	51-PTR-101 C	27.5	10/20	9,08	9,072	0,383	23,7
4	51-PTR-101 D	27.5	10/20	9,13	9,122	0,385	23,7
5	51-PTR-101 E	27.5	10/20	11	10,99	0,464	23,7
6	Trafo PLN	30	150/20	12,5	12.497	0.278	45

Dari table diatas, generator beroperasi dengan beberapa kondisi yaitu, 3 generator dengan kondisi 2 generator lainnya standby, lalu 4 generator dengan 1 generator standby, dan yang terakhir seluruh generator aktif dengan total beban pembangkit yang disupply sebesar 59 MW. Berikut data pembangkit sebelum dan sesudah dilakukannya pengalihan beban ke PLN yang berjumlah 22 MW.

- **3 Generator sebelum beban dialihkan ke PLN**

Tabel 3.3 Data pembangkit dengan operasi 3 generator sebelum beban dialihkan ke PLN

ID	Rating (MW)	Mw Generation	%PF	Mvar Generation	%Generation
51-G-101 A	22	19,648	89,3	14,091	89,3
51-G-101 B	22	OFF	OFF	OFF	OFF
51-G-101 C	22	OFF	OFF	OFF	OFF
51-G-101 D	22	19,8	81,69	14,24	90
51-G-101 E	22	19,8	85,66	11,927	90
Total		59,248			

- **4 Generator sebelum beban dialihkan ke PLN**

Tabel 3.4 Data pembangkit dengan operasi 4 generator sebelum beban dialihkan ke PLN

ID	Rating (MW)	Mw Generation	%PF	Mvar Generation	%Generation
51-G-101 A	22	14,927	85,83	8,926	67,9
51-G-101 B	22	14,85	74,24	13	67,5
51-G-101 C	22	OFF	OFF	OFF	OFF
51-G-101 D	22	14,85	85,47	9,018	67,5
51-G-101 E	22	14,85	89,22	7,517	67,5
Total		59,477			

- **4 Generator setelah beban dialihkan ke PLN**

Tabel 3.5 Data pembangkit dengan operasi 4 generator setelah beban dialihkan ke PLN

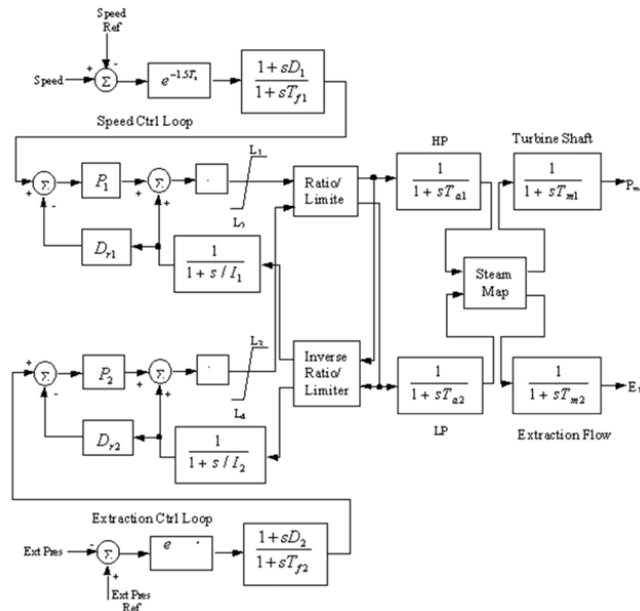
ID	Rating (MW)	Operated (MW)	%PF	Mode	%Generation
51-G-101 A	22	9,3	84,59	Droop	42,3
51-G-101 B	22	9,551	85,14	Droop	43,4
51-G-101 C	22	OFF	OFF	OFF	OFF
51-G-101 D	22	9,3	84,33	Droop	42,3
51-G-101 E	22	9,3	88,44	Droop	42,3
Total		37,451			

- **3 Generator setelah beban dialihkan ke PLN**

Tabel 3.6 Data pembangkit setelah integrasi dengan PLN 100 % ketika 3 generator aktif

ID	Rating (MW)	Operated (MW)	%PF	Mode	%Generation
51-G-101 A	22	12,467	84,01	Droop	56,7
51-G-101 B	22	OFF	OFF	OFF	OFF
51-G-101 C	22	OFF	OFF	OFF	OFF
51-G-101 D	22	12,5	83,81	Droop	56,8
51-G-101 E	22	12,5	87,98	Droop	56,8
PLN	30 MVA	22,267	86,38	Isoch	74,14
Total		37,467			

Generator STG 51-G-101 A, B, C, D, dan E menggunakan governor Woodward 505. Pemodelan kontroler steam turbine control Woodward 505E mengacu pada block diagram yang ditunjukkan pada Gambar 7. Block diagram ini mengacu pada referensi manual Woodward 505E yang tersedia pada datasheet.



Gambar 3.9 Block diagram Woodward 505E

Tabel 3.7 Data nilai yang digunakan pada simulasi untuk controller Woodward 505E

Parameter	Definition	Input Value	Units
Mode	Droop or Isoch	Droop	
Droop1	Steady-state speed droop	3.5	%
Droop2	Extraction loop droop	2	%
Efmax	Max. extraction flow	122.9	T/Hr
ExtFlow	Turbine extraction flow	1	%
ExtPress	Extraction pressure	1	%
Hpa	Min. extraction @ max. power	52.9	T/Hr
HPb	Max. extraction @ min. power	97.4	T/Hr
HPc	Min. extraction @ min. power	45.4	T/Hr
Hpmax	Max. HP flow	172	T/Hr

I1 <D>	Speed loop integral (Droop mode)	1	%
I1 <I>	Speed loop integral gain in (Isoch mode)	1	%
I2	Extraction loop integral gain	0.3	%
L1	Up limit for speed loop output	107	%
L2	Low limit for speed loop output	13	%
L3	Up limit for extraction loop output	100	%
L4	Low limit for extraction loop output	0	%
P1 <D>	Speed loop proportional gain (Droop mode)	3	%
P1 <I>	Speed loop proportional gain (Isoch mode)	5	%
P2	Extraction loop proportional gain	0.3	%
Ramprate	Speed reference ramp rate	0.37	%/Sec.
Sa	Max. power @ min. extraction	21900	kW
Sb	Min. power @ max. extraction	5290	kW
Sc	Min. power @ min. extraction	-208.2	kW
SDR1	Speed loop parameter (Droop mode)	4	%
SDR1 <I>	Speed loop parameter (Isoch mode)	4	%
SDR2	Extraction loop parameter	4	%
Smax	Max. power	20100	kW
Ta1	HP valve actuator time constant	0.1	Sec.
Ta2	LV valve actuator time constant	1	Sec.
Tm1	Turbine time constant (shaft power output)	0.1	Sec.
Tm2	Turbine time constant (extraction flow)	1	Sec.
Ts	Controller sample time	0.015	Sec.

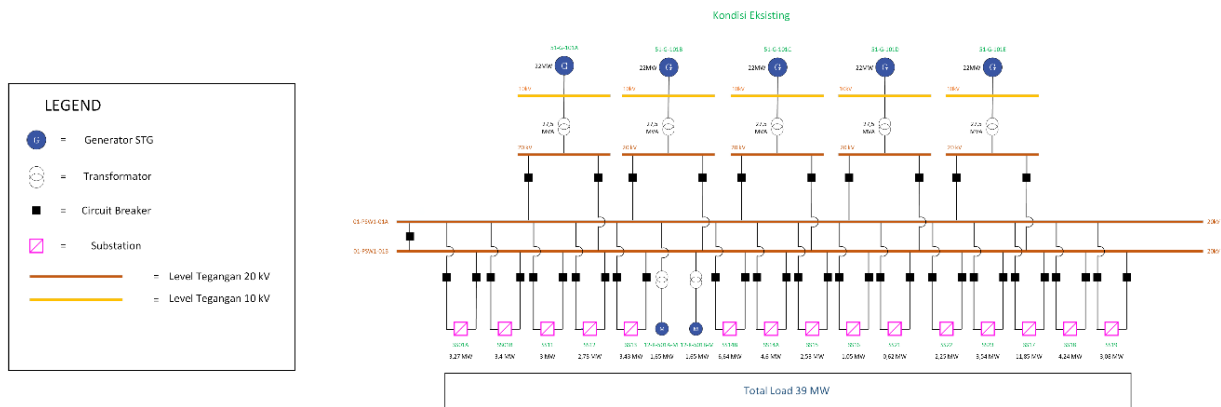
Tabel 3.8 Data Power Flow pada Trafo

ID	MVA	kV	%Z
51-PTR-101 A	27.5	150/20	9
51-PTR-101 B	27.5	150/20	9
51-PTR-101 C	27.5	150/20	9
51-PTR-101 D	27.5	150/20	9
51-PTR-101 E	27.5	150/20	11

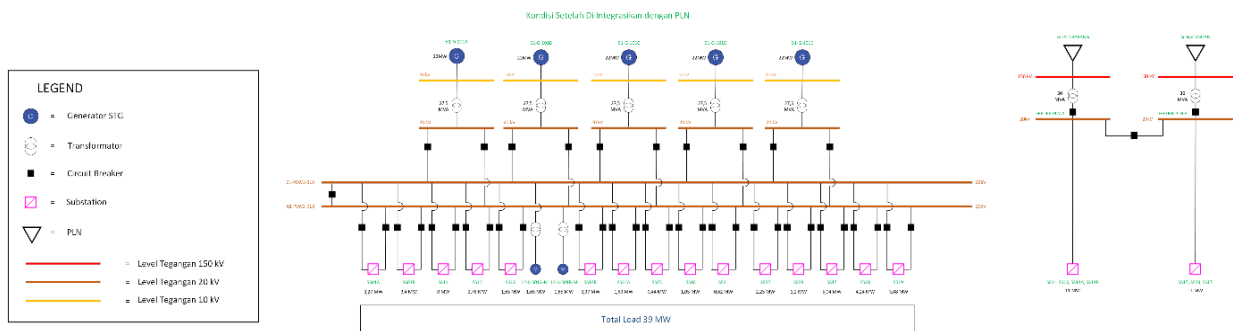
3.1.3 Pemodelan Sistem Kelistrikan Pada *Software* ETAP

Pemodelan sistem kelistrikan PT. Pertamina RU VI Balongan dilakukan dalam bentuk sebuah *single line diagram* menggunakan *software* ETAP 21 , dalam tahap ini akan dilakukan pemodelan sistem sekaligus memasukkan data ke dalam *single line diagram* yang telah dibuat. Pemodelan ini dibuat bertujuan untuk menganalisis *Load Flow* dan *Transien Stability* yang dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Selain itu, juga akan dibuat beberapa pola mode operasi yang memungkinkan dari *single line diagram* yang ada serta scenario-skenario pelepasan beban dan terjadinya *short circuit*. Hal ini diharapkan bisa mewakili masalah-masalah yang ada di lapangan sehingga bisa dilakukan beberapa mitigasi ketika tiba-tiba terjadi gangguan yang tidak diharapkan.

Berikut merupakan gambar SLD sebelum dan sesudah di integrasikan dengan PLN



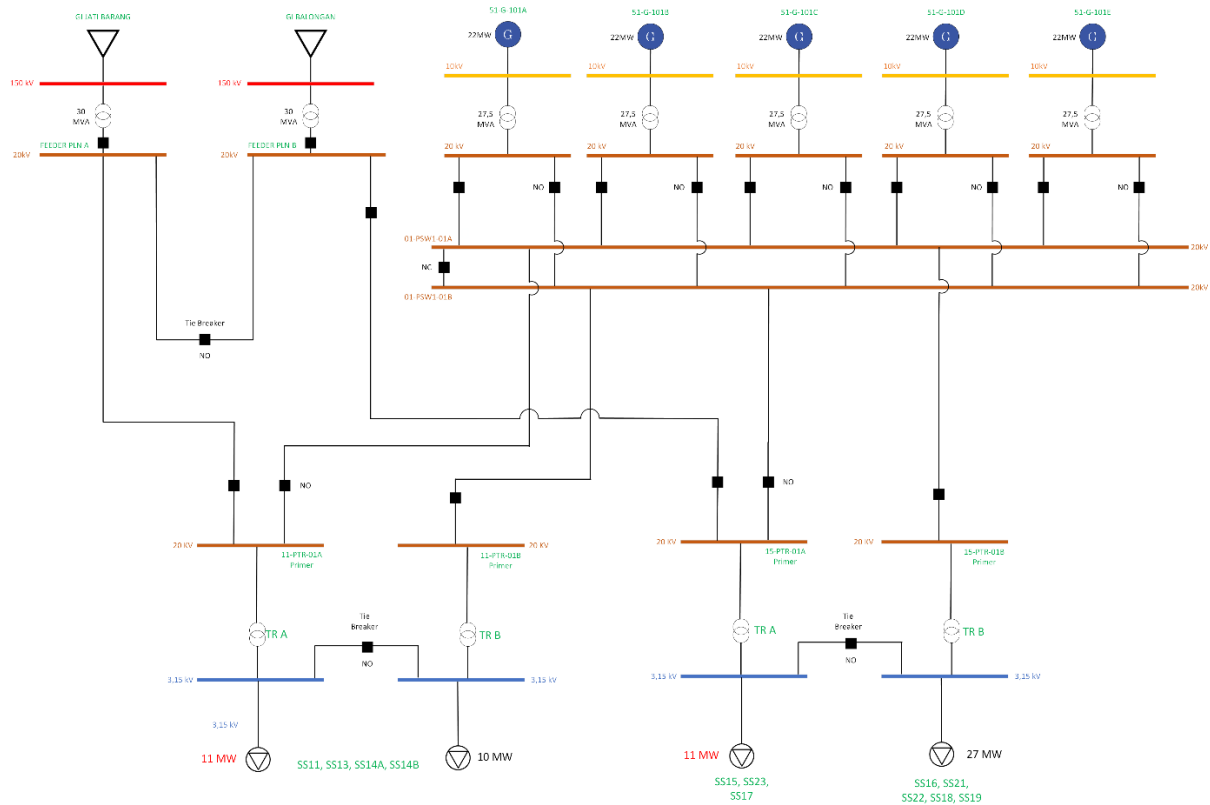
Gambar 3.10 Single Line Diagram sebelum di Integrasi Daya dengan PLN



Gambar 3.11 Single Line Diagram sesudah di Integrasi Daya dengan PLN

Dapat dilihat pada gambar 3.11, terdapat beban yang dialihkan ke PLN yaitu sebesar 22 MW yang terdiri dari beberapa beban yang ada di substation SS11, SS13, SS14A, SS14B, SS15, SS23 dan SS17. Rencana daya langganan yang akan dilakukan dengan integrasi PLN itu berjumlah 30 MVA.

Untuk lebih jelas, maka dapat dilihat bagaimana penyambungan PLN ke beberapa substation pada gambar berikut ini.



Gambar 3.12 Overview Single Line Diagram ketika di Integrasi dengan PLN

Dapat dilihat pada gambar ini, langganan daya PLN sebesar 30 MVA, dan beban yang dialihkan ke PLN berjumlah 22 MW. Sehingga terjadi 2 kondisi dimana PLN island dan Pembangkit Island.

3.1.4 Percobaan Simulasi

Pada simulasi ini akan dilakukan analisis kestabilan transien dan mekanisme pelepasan beban di PT. Pertamina RU VI Balongan akibat integrasi daya oleh PLN. Beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam tugas akhir ini adalah nilai respon dari frekuensi, tegangan, sudut rotor, daya mekanik, daya elektrik, dari masing-masing bus yang telah ditentukan.

3.1.5 Analisis Hasil Simulasi

Simulasi dan analisis kestabilan transien dilakukan untuk mengevaluasi kejadian yang dapat mengakibatkan sistem kehilangan kestabilan dengan mempertimbangkan kondisi frekuensi dan tegangan akibat integrasi daya, dan *short circuit*. Hasil simulasi selanjutnya akan dianalisis yang dilanjutkan dengan penentuan skema serta mekanisme *load shedding* yang tepat untuk diterapkan dalam sistem kelistrikan pabrik.

3.1.6 Penyusunan Buku Tugas Akhir

Apabila tahapan penelitian telah dilakukan dengan baik dan berjalan sesuai standardnya, selanjutnya akan dilakukan penyusunan buku laporan tugas akhir. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan disertai dengan saran dan rekomendasi yang tepat untuk penelitian selanjutnya.

3.2 Bahan dan peralatan yang digunakan

Bahan dan peralatan yang akan digunakan selama proses penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Hardware
Hardware yang digunakan berupa laptop sebagai alat atau media untuk melakukan penelitian, terutama pada kemampuan menjalankan software yang diperlukan.
2. Software
Software yang digunakan adalah ETAP dan Microsoft Excel untuk keperluan menjalankan simulasi agar dapat menentukan sistem pelepasan beban, sehingga dapat diterapkan pada PT. Pertamina RU VI Balongan.

3.3 Urutan pelaksanaan penelitian

Berikut merupakan urutan pelaksanaan penelitian tugas akhir:

Tabel 3.9 Jadwal Kegiatan Penelitian

Nama Kegiatan	Minggu ke-															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Studi Literatur																
Pengumpulan Data Sistem Kelistrikan																
Pemodelan Sistem Kelistrikan Pada Software ETAP																
Percobaan Simulasi																
Analisis Hasil Simulasi																
Penyusunan Buku Tugas Akhir																

BAB 4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Studi Kasus Kestabilan Transien

Data-data yang sudah didapatkan sebelumnya dimasukkan kedalam software ETAP 21 yang akan digunakan untuk dilakukannya simulasi transien. Simulasi dilakukan dengan pola pembangkitan operasi yang memungkinkan. Terdapat beberapa studi kasus yang digunakan yaitu :

4.1.1 Generator Outage

Pada bagian ini akan diamati respon dari sistem akibat generator outage. Sistem yang dilihat dibagi menjadi 2 kondisi yaitu sebelum terhubung PLN dan sesudah terhubung dengan PLN. Gangguan akan dilihat dengan mempertimbangkan respon frekuensi, tegangan, dan kapasitas trafo pada PLN dimana untuk parameter evaluasi menentukan apakah daya yang melewati trafo PLN masi dalam batas langganan. Skema load shedding yang diterapkan didasarkan pada status PLC sebagai sistem proteksi utama.

4.1.2 Short Circuit

Pada kasus ini akan diamati respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat pada bus dengan level tegangan 20 kV, bus dengan level tegangan 10 kV, bus dengan level tegangan 3.15 kV dan bus dengan level tegangan 0.42 kV. Gangguan akan diperhatikan dengan mempertimbangkan respon pada sistem yaitu respon frekuensi dan tegangan.

4.2 Simulasi Kestabilan Transien

Dalam analisis kestabilan transien pada sistem kelistrikan PT Pertamina RU VI Balongan, akan diperhatikan berdasarkan kemungkinan pola operasi yang akan digunakan. Beberapa kasus yang akan diamati adalah hilang atau lepasnya salah satu sumber pembangkit, PLN mengalami trip, dan hubung singkat di beberapa jenis level tegangan pada sistem. Respon yang akan dilihat adalah respon frekuensi, respon tegangan, sudut rotor, dan kapasitas trafo PLN. Respon sistem tersebut dijadikan dasar untuk menghitung besarnya beban yang harus dilepas.

Proses penentuan skema pelepasan beban dilakukan dengan mengacu pada standar frekuensi dan standar pelepasan beban (ANSI/IEEE, C37.106-1987). Tujuan dari bagian ini adalah memahami respons generator akibat gangguan serta menentukan besaran beban yang perlu dikurangi agar sistem tetap stabil. Oleh karena itu, saat terjadi gangguan dan frekuensi terus menurun, pemutusan beban diperlukan untuk menjaga stabilitas sistem. Standar yang digunakan untuk menentukan operasi frekuensi yang diperbolehkan adalah IEEE Std. C37.102 2006 untuk generator turbin uap dengan frekuensi 50 Hz.

4.3 Skenario Kestabilan Transien

Dalam skenario kestabilan transien, perlu dilakukan penyusunan pola operasi generator dan pemodelan skema pelepasan beban untuk menjaga stabilitas sistem pada PT Pertamina RU VI Balongan. Tujuannya adalah untuk mengantisipasi gangguan pada operasi sistem sehingga tetap stabil dan berkelanjutan. Dalam proses penyusunan pola operasi pembangkitan, dilakukan perhitungan terhadap total daya mampu yang dapat dihasilkan oleh masing-masing pembangkit. Hasil perhitungan ini digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan pola operasi yang layak diterapkan. Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, pola operasi yang direkomendasikan mencakup penggunaan satu unit PLN bersama dengan dua generator aktif tiga generator

standby, satu unit PLN bersama dengan tiga generator aktif dua generator standby, dengan total keseluruhan beban sebesar 59 MW. Informasi lebih rinci dapat ditemukan dalam tabel berikut.

Tabel 4.1 Pola Operasi Pembangkitan

Operated Power Supply	Operational Status					Trip ID	Power Loss (MW)
	51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E		
4 Generator	9,722	9,756	0	9,821	8,152	51-G-101E	8,152
	9,722	9,756	0	9,821	8,152	51-G-101 D dan E	17,973
3 Generator	12,547	0	0	12,5	12,5	51-G-101E	12,5
		: Trip					
		: OFF					

Dalam tabel diatas terdapat 2 pola operasi yang digunakan dimana kondisi pengoperasian dengan 4 dan 3 generator. Generator yang dimatikan adalah generator 51-G-101 E dan 51-G-101 D.

4.3.1 Skenario Kasus Kestabilan Transien

Dari hasil penentuan pola operasi pembangkitan, didapatkan hasil skenario kasus yang akan dimanfaatkan dalam simulasi. Berikut disajikan tabel yang menjelaskan pola operasi terkait pada kasus *Generator outage* , dan kasus *Short Circuit* yang akan digunakan.

Tabel 4.2 Skenario Kasus Kestabilan Transien berupa Generator Outage

Operated Power Supply	Skenario Kasus	Keterangan
4 Generator	4 Generator + 51-G-101 E Trip	4 generator beroperasi (51-G-101 C OFF) kemudian 51-G-101 E mengalami trip pada sistem
	4 Generator + 51-G-101 D dan 51-G-101 E Trip	4 generator beroperasi (51-G-101 C OFF) kemudian 51-G-101 D dan 51-G-101 E mengalami trip pada sistem
3 Generator	3 Generator + 51-G-101 E Trip	3 generator beroperasi (51-G-101 B dan C OFF) kemudian 51-G-101 E mengalami trip pada sistem

Dalam skenario kasus yang telah diberikan, maka respon terhadap gangguan yang akan diamati adalah di double busbar pada sistem kelistrikan PT Pertamina Balongan RU VI yaitu di bus 01-PSW1-01A dan 01-PSW1-01B.

Pada kasus gangguan 3 phase *Short Circuit*, bus yang digunakan tiap parameter tegangan adalah

- 1) Bus pada 12-PTR-501A Primary Bus untuk mewakili tegangan 20 kV
- 2) Bus pada 51-G-101A BUS untuk mewakili tegangan 10 kV
- 3) Bus pada 01-PMC2-02B untuk mewakili tegangan 3.15 kV
- 4) Bus pada Bus 3-1 untuk mewakili tegangan 0.42 kV

4.3.2 Pemodelan Skenario Load Shedding

Pemodelan yang digunakan dalam simulasi transien merujuk pada data dan asumsi yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Deskripsi umum yang digunakan dalam simulasi adalah sebagai berikut.

- a) Total daya dalam semua skenario sistem dengan pola operasi 4 Generator aktif dan 3 Generator Aktif adalah 37 MW.
- b) Jumlah minimum generator yang beroperasi adalah 3 unit.
- c) Gangguan kestabilan yang disimulasikan berupa pelepasan beban berdasarkan status dan frekuensi sesuai dengan skenario yang telah dijelaskan pada Tabel 4.2. Parameter yang akan diamati dalam skenario Pelepasan beban diantaranya adalah stabilitas frekuensi
- d) Dalam pemodelan skenario pelepasan beban, akan disajikan beberapa skema beserta penjelasannya sebagai berikut.

Tabel 4.3 Pemodelan Skenario Load Shedding

Skenario	Nama Skenario	Keterangan
A	Tanpa Load Shedding	Menggambarkan keadaan <i>generator outage</i> tanpa mengalami skema <i>load shedding</i> (pelepasan beban) yang mana kondisi ini diasumsikan <i>load shedding failed</i> . Hal tersebut bisa menjadi sebagai respon terburuk yang mungkin dapat terjadi pada sistem setelah mengalami gangguan
B	Load Shedding Status	Pelepasan beban dilakukan secara kuantum dengan pelepasan beban sesuai dengan daya yang hilang.

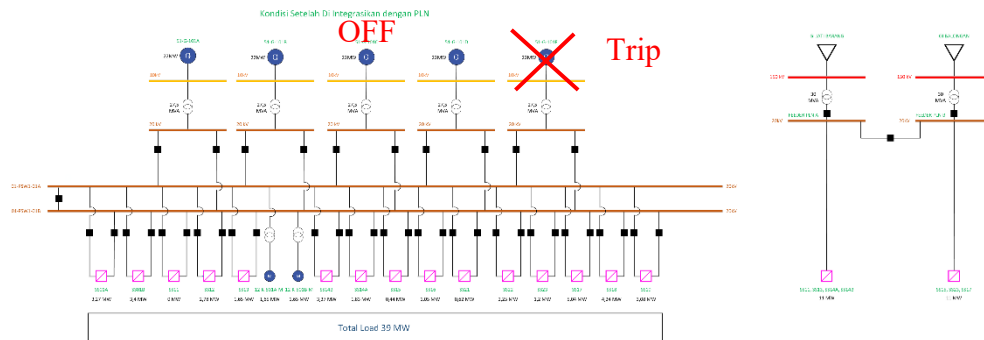
Rancangan Integrasi yang akan dilakukan dari PLN dengan mengalihkan beban sebesar 22 MW. Sehingga beberapa beban-beban critical akan dialihkan ke PLN dengan tujuan agar tetap dapat beroperasi normal walaupun terdapat gangguan seperti hubung singkat / *accidental tripping*. Sehingga sistem memiliki 2 kondisi island yaitu yang pertama kondisi PLN mensupply daya sebesar 22 MW, dan Pembangkit STG mensupply daya sebesar 37 MW.

4.4 Hasil Simulasi Kestabilan Transien

Berikut merupakan hasil analisis kestabilan transien untuk tiap studi kasus yang telah diberikan dari berbagai pola operasi yang ada. Kasus-kasus yang dianalisis meliputi *generator outage* dan *Short Circuit*. Parameter yang diamati meliputi respon frekuensi, respon tegangan, respon daya elektrik, respon daya mekanik, respon sudut rotor. Tujuan dilakukannya analisis simulasi kestabilan transien ini adalah untuk mempertahankan kestabilan sistem dalam menghadapi berbagai gangguan tersebut.

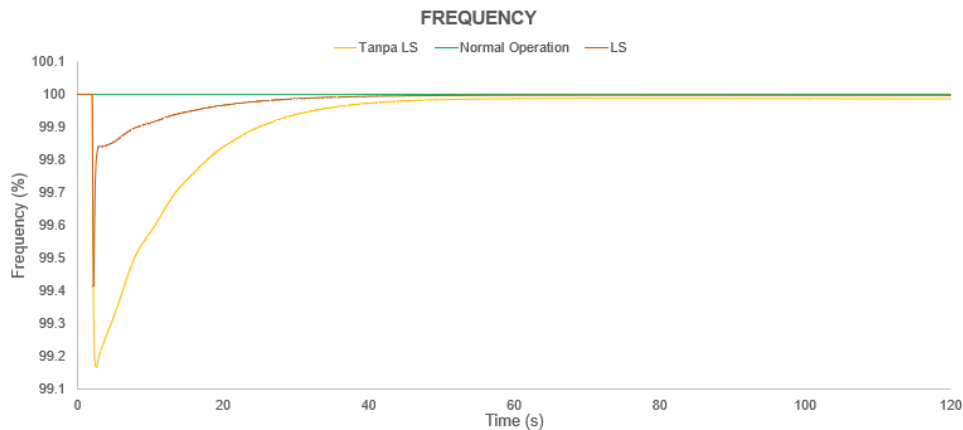
4.4.1 Simulasi kestabilan Transien Generator Outage

4.4.1.1 Pola Operasi 4 Generator (51-G-101 C Off): 51-G-101 E Trip



Gambar 4.1 Pola Operasi 4 Generator (51-G-101 C OFF): STG E Trip

Pada skenario dengan pola operasi 4 generator beroperasi, dengan studi generator STG 51-G-101 E mengalami trip. Analisis kestabilan ini di asumsikan terjadi pada detik ke 2, load shedding status di detik 2.2 dengan total durasi simulasi 120 detik. Parameter yang akan diamati adalah frekuensi sistem, daya mekanis dan elektrik pada STG, sudut rotor, dan tegangan sistem yang masing-masing akan ditunjukkan. Berikut ini merupakan respons dari sistem yang dihasilkan.



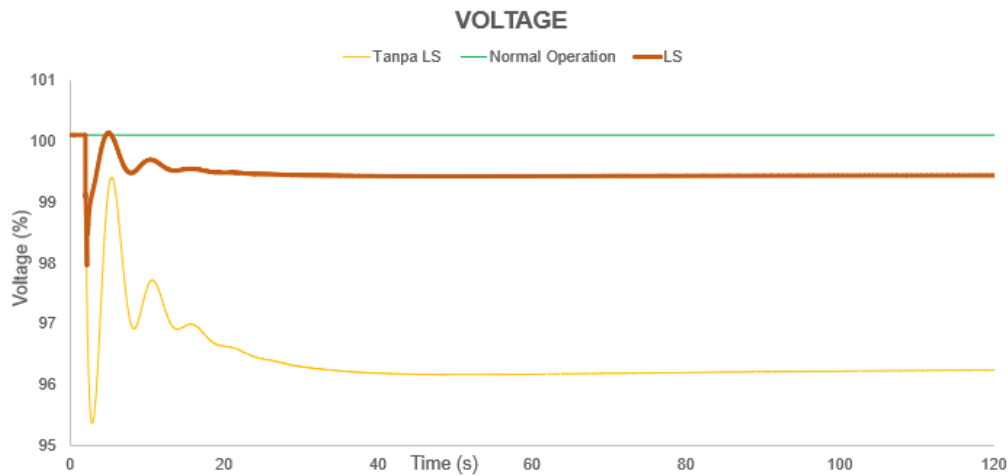
Gambar 4.2 Grafik Respon Frekuensi pada pola operasi 4 Generator: STG E Trip

Tabel 4.4 Data Respon Frekuensi pada pola operasi 4 Generator: STG E Trip

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Tanpa LS	99.16	100	99.98
LS	99,41	100	99,99

Berdasarkan respon frekuensi yang dapat dilihat pada gambar 4.2, bisa disimpulkan bahwa ketika terjadinya kasus *Generator Outage* pada STG 51-G-101 E pada detik ke 2, frekuensi masih bisa mempertahankan kondisinya dan kembali kedalam keadaan normal, hal ini disebabkan oleh generator lainnya dapat menyuplai kekurangan daya yang hilang yaitu sebesar 8,152 mW pada sistem kelistrikan agar kebutuhan daya tetap terpenuhi sehingga frekuensi dan tegangan dapat tetap stabil.

Nilai Frekuensi awalnya turun di detik ke 2 s hingga mencapai 99,16 dan kembali stabil di 99,98% dimana berdasarkan standard IEEE C37. 102 – 2003, nilai tersebut masi berada pada area yang di izinkan sistem untuk bekerja.



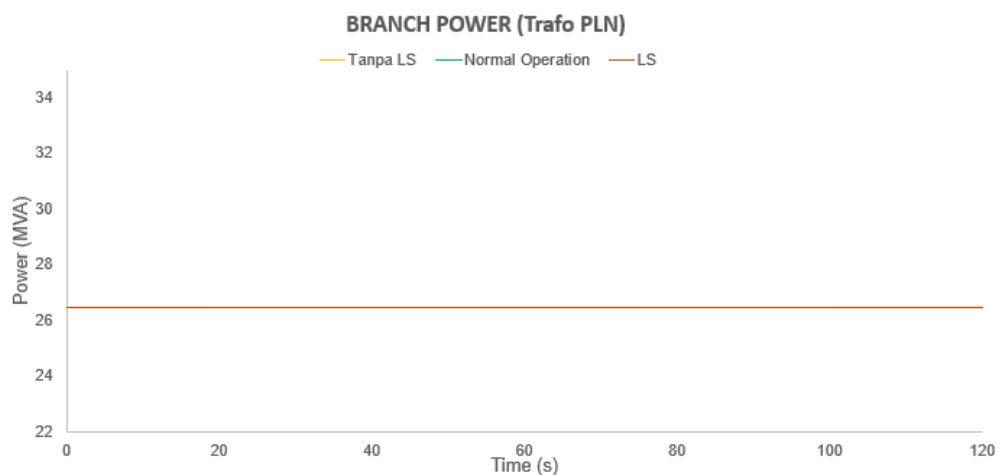
Gambar 4.3 Grafik Respon Tegangan pada pola operasi 4 Generator: STG E Trip

Tabel 4.5 Data Respon Tegangan pada pola operasi 4 Generator: STG E Trip

Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100,106	100,107	100,106
Tanpa LS	95,36	100,106	96,24
LS	97,97	100,14	99,44

Selanjutnya pada respon tegangan dapat dilihat pada gambar 4.3, hasil simulasi menunjukkan nilai tegangan tidak mengalami penurunan yang signifikan ketika salah satu generator yaitu 51-G-101 E mengalami trip dan masih berada dalam kondisi yang di izinkan sesuai dengan standard operasi tegangan IEEE 1159-2019.

Dapat dilihat nilai respon tegangan paling rendah terjadi ketika terjadinya STG E mengalami trip pada detik ke 2, tapi mitigasi load shedding belum dilakukan, nilai respon tegangan pada main busbar stabil di 96,24% dan kondisi ini dianggap masih dalam batas yang di izinkan.

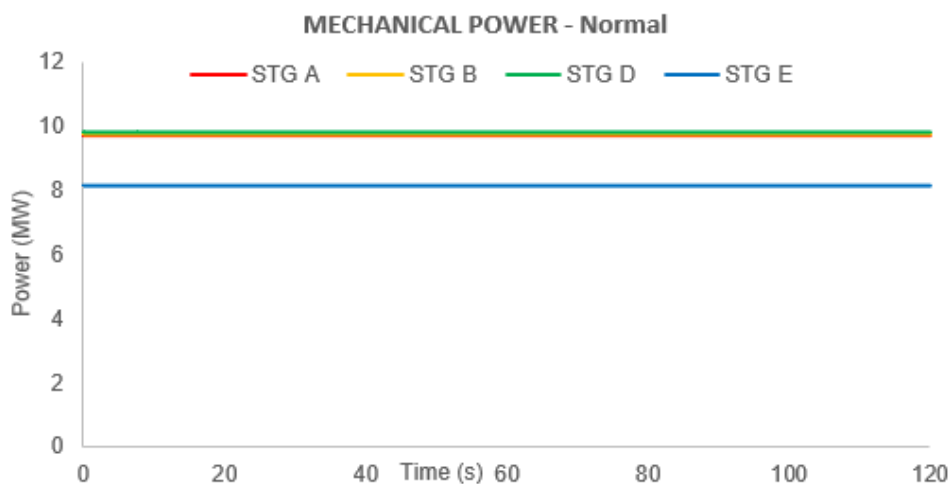


Gambar 4.4 Grafik Respon Trafo PLN pada pola operasi PLN dan 4 Generator: STG E Trip

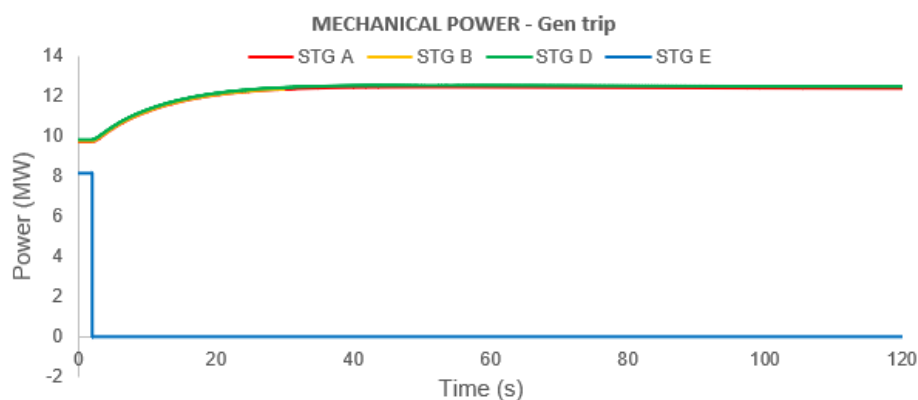
Tabel 4.6 Data Respon Trafo PLN pada pola operasi PLN dan 4 Generator: STG E Trip

Skema	Branch Power (MVA)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	26,45	26,46	26,45
Tanpa LS	26,25	26,46	26,45
LS	26,45	26,46	26,45

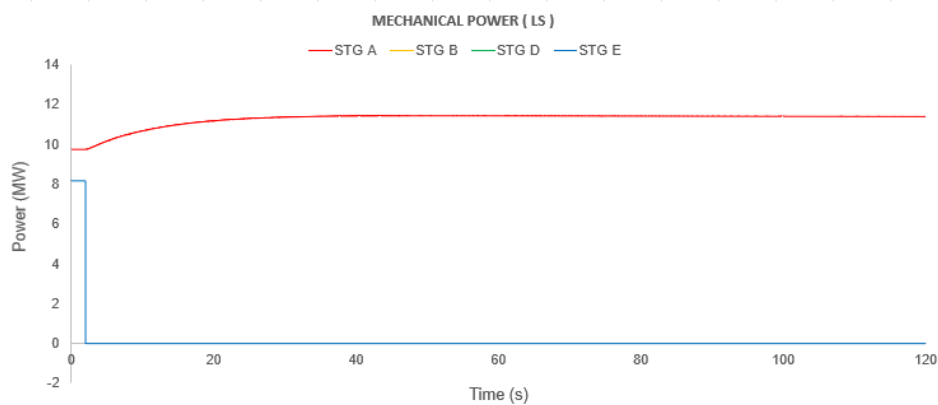
Dapat dilihat hasil respon Trafo PLN dengan studi kasus STG 51-G-101 E Trip, dapat diamati bahwa tidak terjadinya lonjakan daya yang signifikan saat terjadinya STG E Trip ketika PLN tidak disambungkan ke beban pembangkit. Hal ini disebabkan karena PLN dan Pembangkit tidak saling sinkron sehingga ketika salah satu STG trip maka PLN akan tetap menyuplai daya dalam kondisi normal.



Gambar 4.5 Respon grafik Daya Mekanik STG lainnya sebelum STG E Trip



Gambar 4.6 Respon grafik Daya Mekanik STG lainnya sesudah STG E Trip Tanpa Status



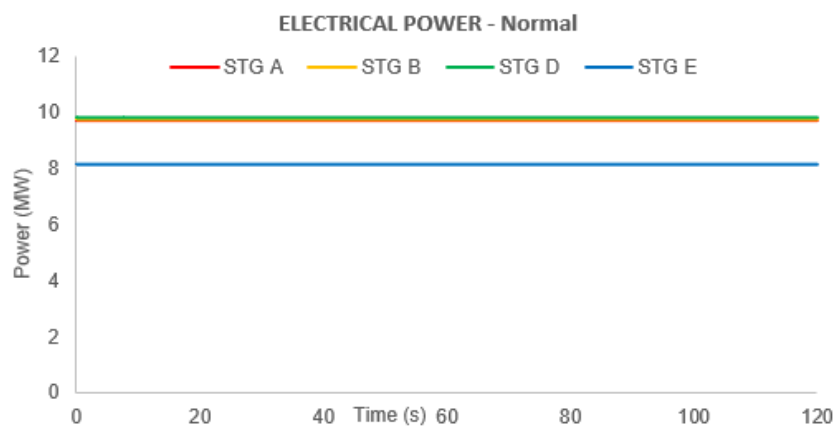
Gambar 4.7 Respon grafik daya mekanik STG lainnya sesudah STG Trip dan Status

Tabel 4.7 Data respon daya mekanik STG lainnya

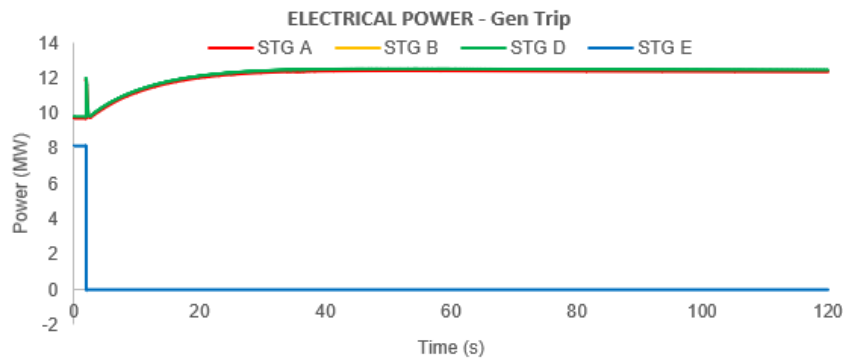
Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Tanpa LS	Steady State (MW)	12,39	12,41	OFF	12,47	0
LS	Steady State (MW)	11,38	11,4	OFF	11,47	0

Berdasarkan hasil simulasi dan respon daya mekanik pada studi kasus STG 51-G-101 E Trip, dapat dilihat bahwa ketika STG E mengalami trip pada detik ke 2, maka generator lainnya mengalami kenaikan daya sebesar 3 Mw untuk mempertahankan daya yang hilang yaitu 8,152 Mw, kenaikan generator ini juga masi dalam batas range dan bisa dikatakan aman untuk digunakan.

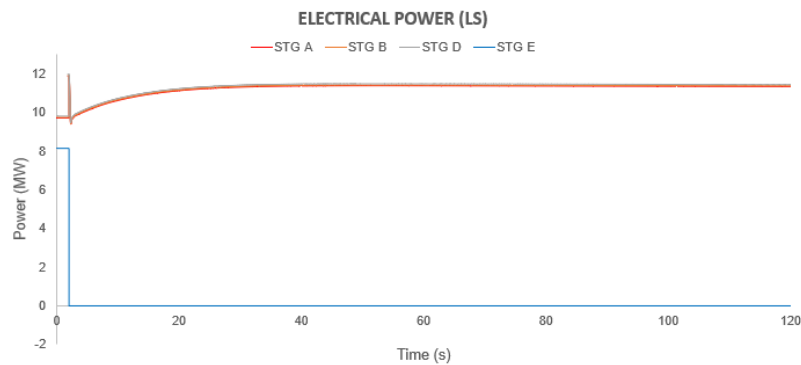
Ketika dilakukan *load shedding* status maka kondisi daya mekanik hampir mendekati kondisi normal operasinya sehingga jika dilakukan mitigasi ini maka respon daya mekanik seluruh pembangkit hanya mengalami kenaikan 10% dari normal operasinya. Hal ini bertujuan agar masing-masing generator yang masih beroperasi tidak bekerja terlalu maksimal ketika terjadinya gangguan STG E trip dan tidak mengalami panas berlebih.



Gambar 4.8 Respon grafik daya elektrik STG lainnya sebelum STG E Trip



Gambar 4.9 Respon grafik daya elektrik STG lainnya sesudah STG E Trip Tanpa LS



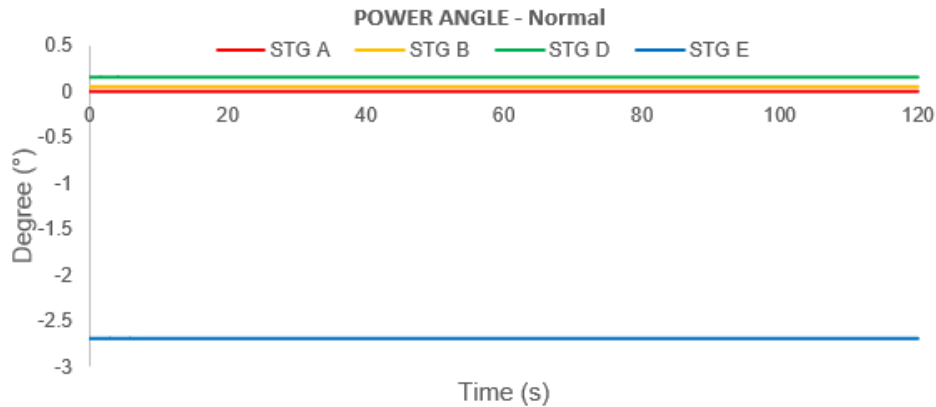
Gambar 4.10 Respon grafik daya elektrik STG lainnya sesudah STG Trip dan LS

Tabel 4.8 Data respon daya elektrik STG lainnya

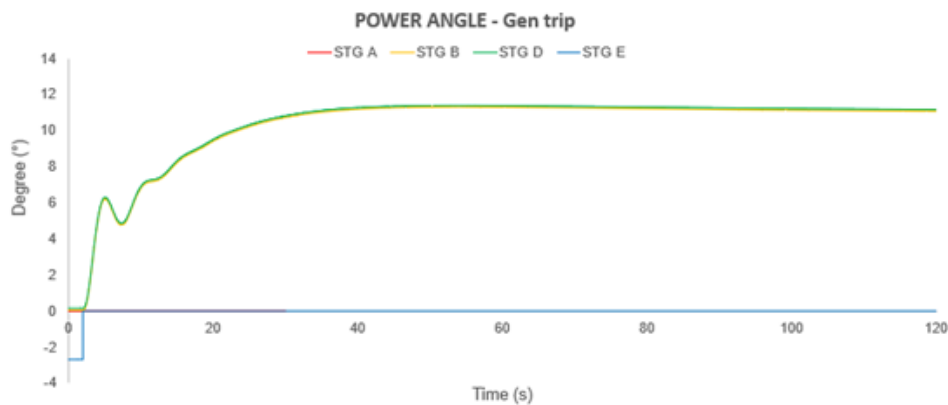
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Tanpa LS	Steady State (MW)	12,35	12,39	OFF	12,45	0
LS	Steady State (MW)	11,35	11,38	OFF	11,45	0

Berdasarkan hasil simulasi dan respon daya mekanik pada studi kasus STG 51-G-101 E Trip, dapat dilihat bahwa ketika STG E mengalami trip pada detik ke 2, maka generator lainnya mengalami kenaikan daya sebesar 3 Mw untuk mempertahankan daya yang hilang yaitu 8,152 Mw, kenaikan generator ini juga masi dalam batas range dan bisa dikatakan aman untuk digunakan.

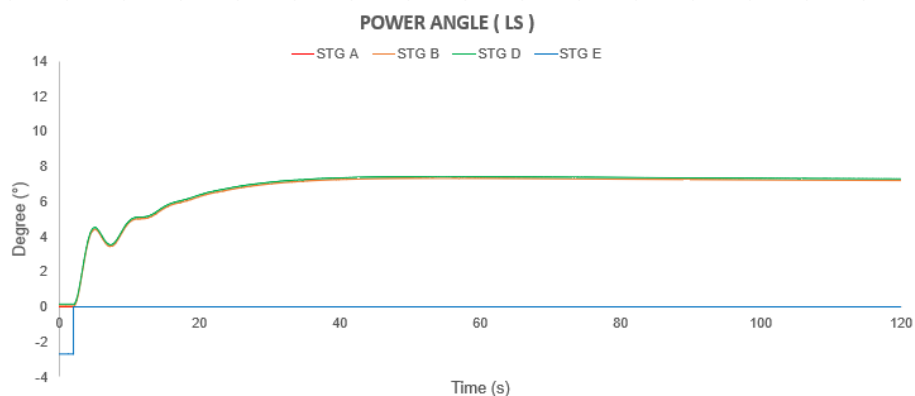
Ketika dilakukan *load shedding* status maka kondisi daya elektrik mengalami kenaikan sehingga jika dilakukan mitigasi ini maka respon daya elektrik seluruh pembangkit mengalami kenaikan mencapai 10%. Hal ini bertujuan agar masing-masing generator yang masih beroperasi tidak bekerja terlalu maksimal ketika terjadinya gangguan STG E trip dan tidak mengalami panas berlebih.



Gambar 4.11 Respon grafik sudut rotor STG lainnya sebelum STG E Trip



Gambar 4.12 Respon grafik sudut rotor STG lainnya sesudah STG E Trip Tanpa Status



Gambar 4.13 Respon grafik sudut rotor STG lainnya sesudah STG Trip dan Status

Tabel 4.9 Data respon sudut rotor STG lainnya

Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	0,05	OFF	0,15	-2,69
Tanpa LS	Steady State (MW)	0	11,07	OFF	11,16	0
LS	Steady State (MW)	0	7,2	OFF	7,2	0

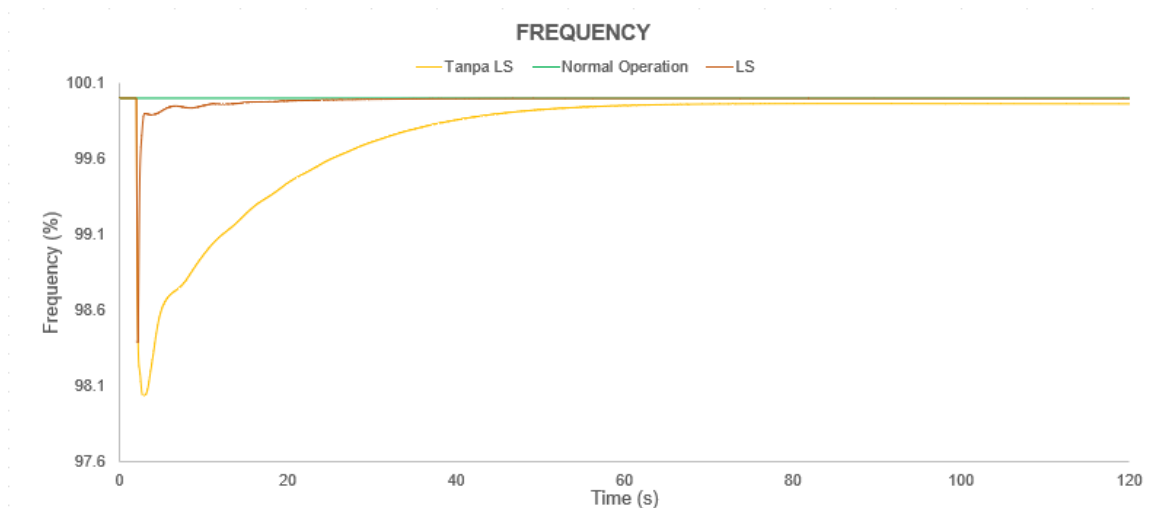
Berdasarkan hasil simulasi dan respon sudut rotor pada masing masing generator, dapat dilihat untuk STG A masi berada dalam posisi stabil, sedangkan STG B dan D mengalami kenaikan hingga mencapai 11° dan stabil diangka tersebut, sedangkan untuk STG E mengalami penurunan hingga mencapai titik 0 derajat pada detik kedua akibat mengalami trip dan menjadi fokus studi kasus. Apabila sudut rotor melebihi 180° , maka akan berdampak ke sistem kelistrikan yakni ketidakstabilan sistem yang bisa menyebabkan *loss of synchron* pada masing masing generator. Namun, pada kasus ini STG A masih bisa mempertahankan kestabilan sudut rotornya saat kondisi tanpa load shedding, sedangkan STG B dan D mengalami kenaikan hingga mencapai 11° dan stabil di kondisi tersebut, hal ini masi berada dalam batas yang di izinkan.

4.4.1.2 Pola Operasi 4 Generator (51-G-101 C Off): 51-G-101 E dan 51-G-101 D Trip



Gambar 4.14 Pola Operasi 4 Generator (51-G-101 C OFF): STG E dan D Trip

Pada skenario dengan pola operasi 4 generator beroperasi, dengan studi kasus generator STG 51-G-101 D dan 51-G-101 E mengalami trip. Analisis kestabilan ini dilakukan pada detik ke 2, dengan total durasi simulasi 120 detik. Parameter yang akan diamati adalah frekuensi sistem, daya mekanis dan listrik pada STG, sudut rotor, dan tegangan sistem yang masing-masing akan ditunjukkan. Berikut ini merupakan respons dari sistem yang dihasilkan.



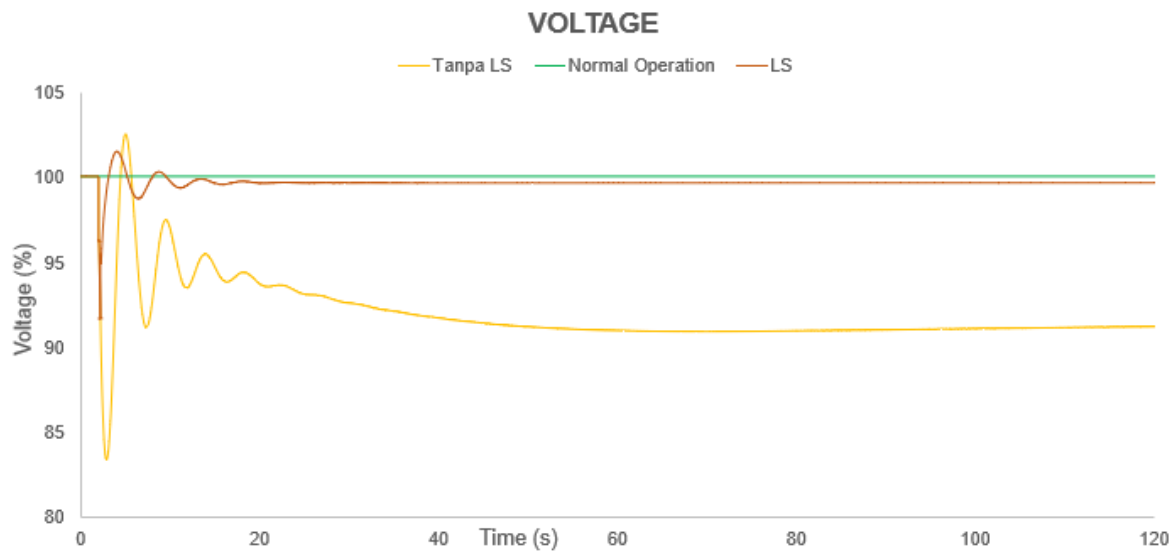
Gambar 4.15 Respon Grafik Frekuensi Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip

Tabel 4.10 Data Respon Frekuensi Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Tanpa LS	98,03	100	99,96
LS	98,39	100	99,99

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, ketika STG D dan STG E mengalami Trip pada detik ke 2, maka total daya yang hilang sebesar 17,973 MW. Dikarenakan generator dan PLN tidak sinkron maka kehilangan daya supply tersebut dibackup terlebih dahulu oleh pembangkit, sehingga frekuensi pada double busbar 01-PSW1-01A dan 01-PSW1-01B mengalami penurunan hingga 98% dan kembali steady di 99,96%. Hal ini disebabkan oleh STG A dan STG B dapat melakukan ramp up untuk mempertahankan kondisi kestabilan.

Ketika dilakukannya *load shedding*, dengan kondisi PLN tidak terintegrasi dengan busbar pembangkit, nilai respon frekuensi yang dihasilkan steady di angka 99,99% walaupun awalnya sempat turun di kondisi *restrictive operation* yaitu diangka 98,39% hal ini sudah masuk kedalam kondisi *continuous operation* setelah dilakukannya *load shedding*.

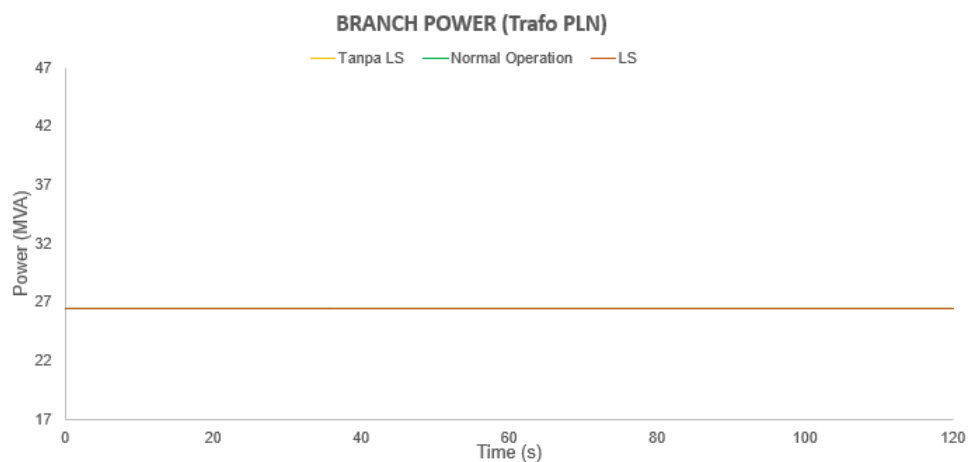


Gambar 4.16 Respon Grafik Tegangan Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip

Tabel 4.11 Data Respon Tegangan Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip

Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100,106	100,107	100,106
Tanpa LS	83,40	102,59	91,23
LS	91,75	101,57	99,71

Berdasarkan hasil simulasi dan hasil respon tegangan yang dapat dilihat pada gambar 4.22 dapat diketahui bahwa ketika terjadinya *accidental tripping* pada STG E dan D Trip, sistem mengalami penurunan tegangan yang signifikan setelah terjadinya gangguan dan tegangan tidak dapat kembali ke kondisi normal dan steady di kondisi 91,23%. Respon dari tegangan ini masih dalam batas standard normal operasi tegangan yang mengacu pada IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*. Hal ini menunjukkan bahwa sistem masih dapat mempertahankan dan menjaga kondisi tegangan tetap berada dalam batas normal operasional.

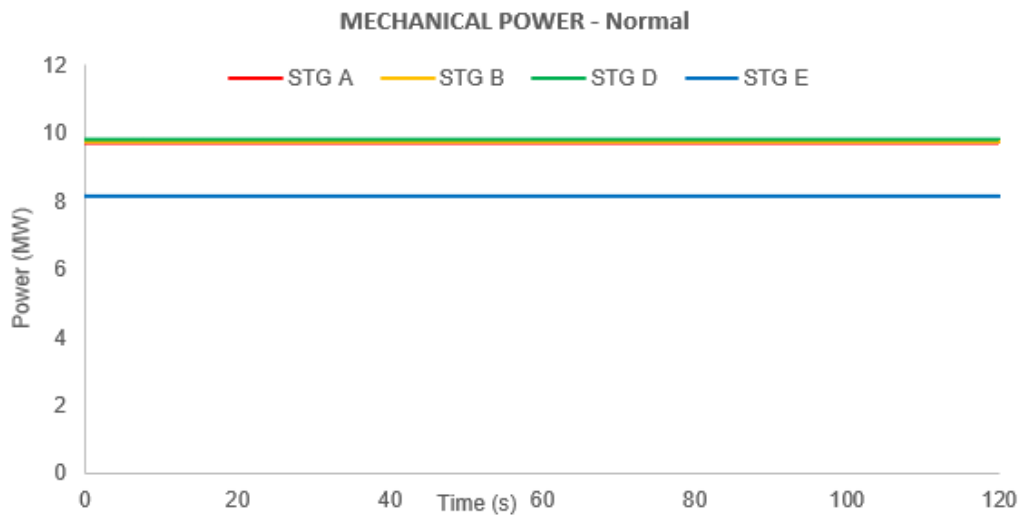


Gambar 4.17 Respon Trafo PLN pada Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip

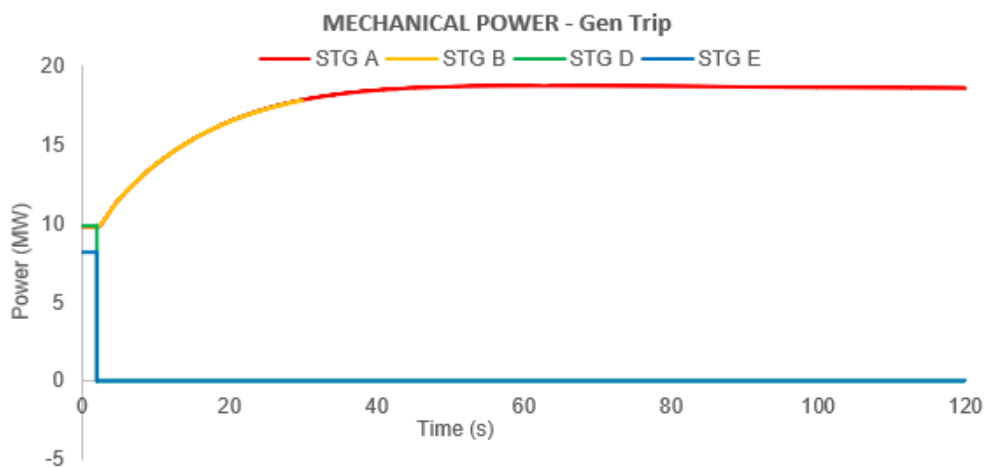
Tabel 4.12 Data Respon Trafo PLN pada Pola Operasi 4 Generator: STG E dan D Trip

Skema	Branch Power (MVA)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	26,45	26,46	26,45
Tanpa LS	26,45	26,46	26,45
LS	26,45	26,46	26,45

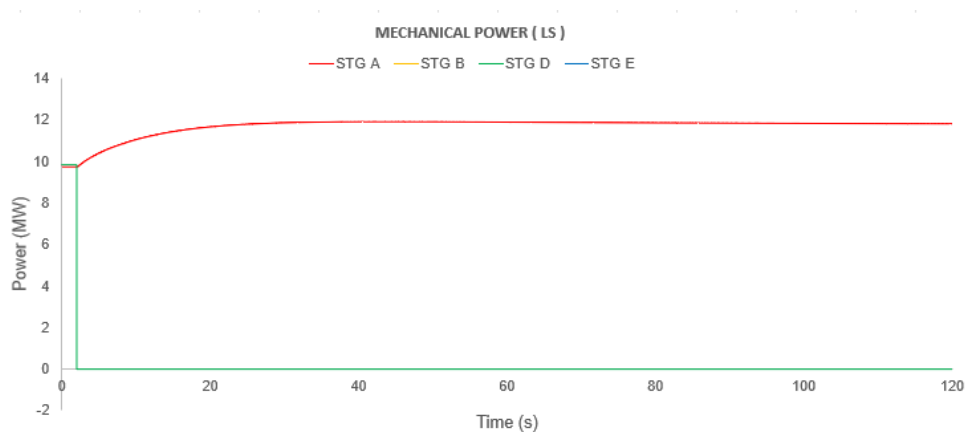
Saat terjadinya *accidental tripping* pada STG E dan D, dapat diamati bahwa tidak terjadinya lonjakan daya yang signifikan saat terjadinya STG E dan D Trip ketika PLN tidak disambungkan ke beban pembangkit. Hal ini disebabkan karena PLN dan Pembangkit tidak saling sinkron sehingga ketika dua STG trip maka PLN akan tetap menyuplai daya dalam kondisi normal.



Gambar 4.18 Respon grafik Daya Mekanik STG lainnya sebelum STG E dan D Trip



Gambar 4.19 Respon grafik Daya Mekanik STG lainnya sesudah STG E dan D Trip Tanpa LS



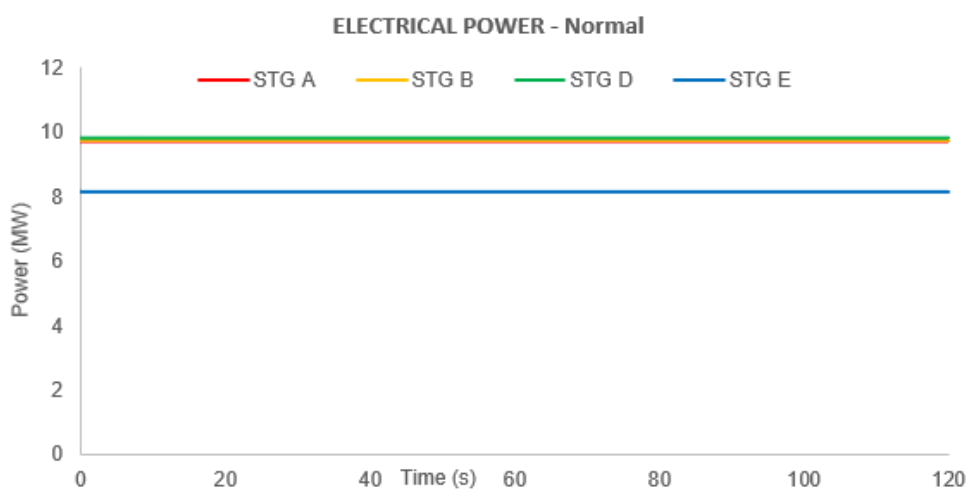
Gambar 4.20 Respon grafik daya mekanik STG lainnya sesudah STG Trip dan LS

Tabel 4.13 Respon Daya Mekanik STG lainnya

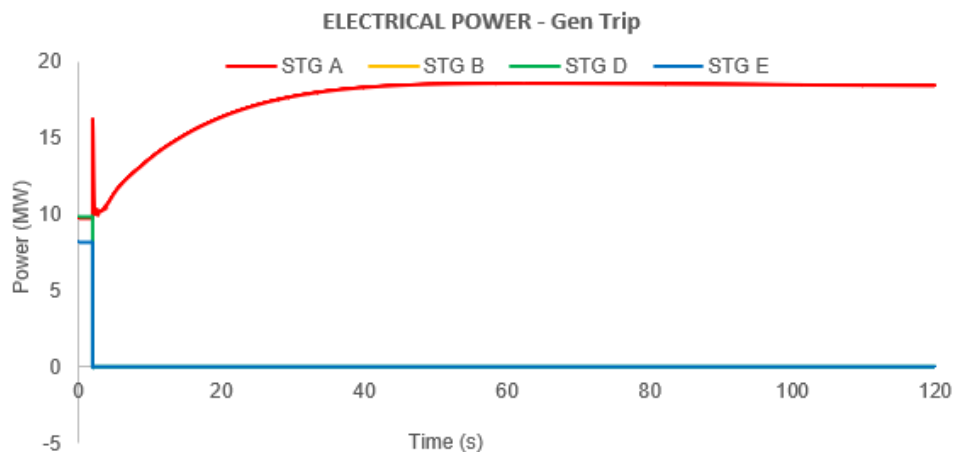
Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Tanpa LS	Steady State (MW)	18,56	18,52	OFF	0	0
LS	Steady State (MW)	11,8	11,83	OFF	0	0

Berdasarkan hasil simulasi dan hasil respon daya elektrik pada pola operasi 4 generator ketika STG E dan D mengalami *accidental tripping*, maka dapat dilihat daya yang hilang ketika STG E dan D trip sebesar 17,96 MW. Sehingga ketika belum dilakukannya *load shedding*, generator A dan B mengalami kenaikan dari operasi normalnya dengan output dayanya menjadi 18,56 MW. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada kondisi sebelum dilakukannya *load shedding* generator bekerja lebih berat dan lebih lama untuk dapat mengembalikan sistem ke kondisi *steady state*.

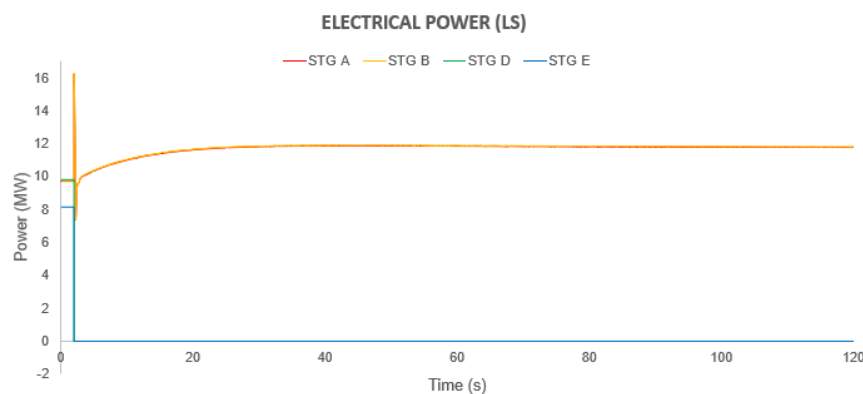
Selanjutnya ketika *load shedding* telah dilakukan, maka respon daya mekanik yang dihasilkan tidak akan mengalami perubahan yang cukup signifikan. Oleh karena itu, kondisi ini dapat dianggap aman untuk digunakan.



Gambar 4.21 Respon grafik daya elektrik STG pada kondisi normal



Gambar 4.22 Respon grafik daya elektrik STG saat terjadinya STG Trip tanpa LS



Gambar 4.23 Respon daya elektrik STG lainnya sesudah STG Trip dan LS

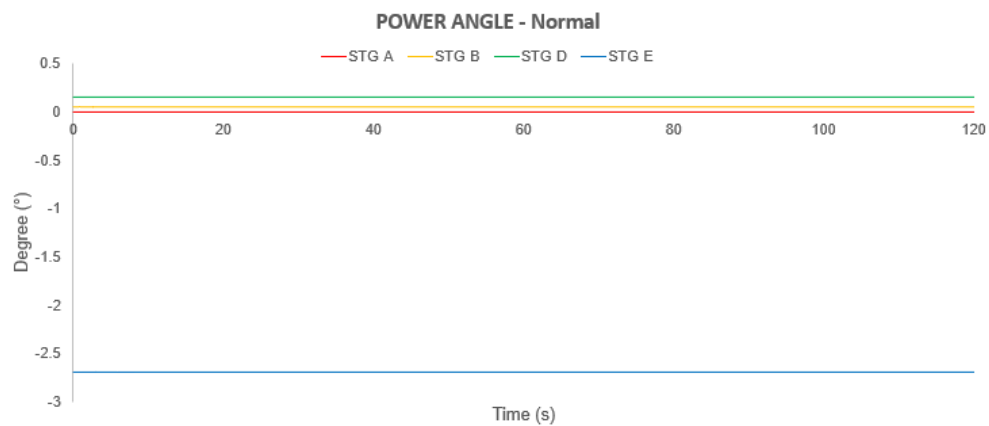
Tabel 4.14 Data Respon Daya Elektrik STG lainnya

Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Tanpa LS	Steady State (MW)	18,40	18,46	OFF	0	0
LS	Steady State (MW)	11,77	11,81	OFF	0	0

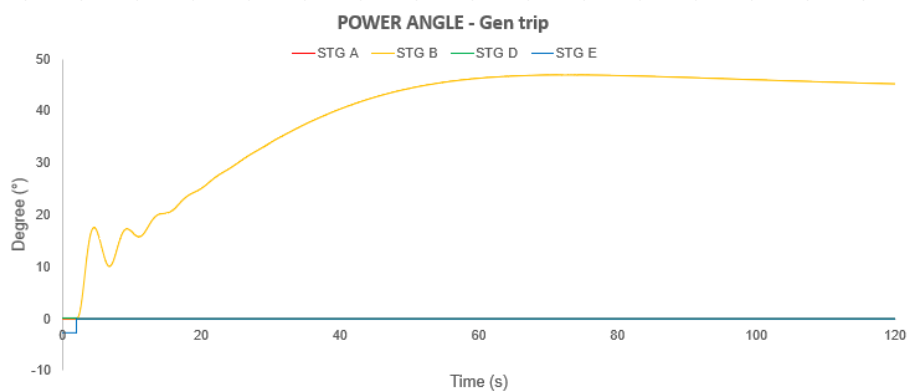
Berdasarkan hasil simulasi dan hasil respon daya elektrik pada pola operasi 4 generator ketika STG E dan D mengalami *accidental tripping*, maka dapat dilihat daya yang hilang ketika STG E dan D trip sebesar 17,96 MW. Sehingga ketika belum dilakukannya *load shedding*, dapat dilihat generator A dan B mengalami kenaikan dengan output daya mencapai 18,4 MW. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kondisi ketika tanpa dilakukannya *load shedding* generator akan bekerja lebih berat dan lebih lama untuk dapat mengembalikan sistem ke dalam kondisi steady state.

Lalu setelah dilakukannya *load shedding*, maka generator akan mengalami *ramp up* masing-masing sebesar 10% dan lebih cepat untuk kembali ke dalam kondisi steady state.

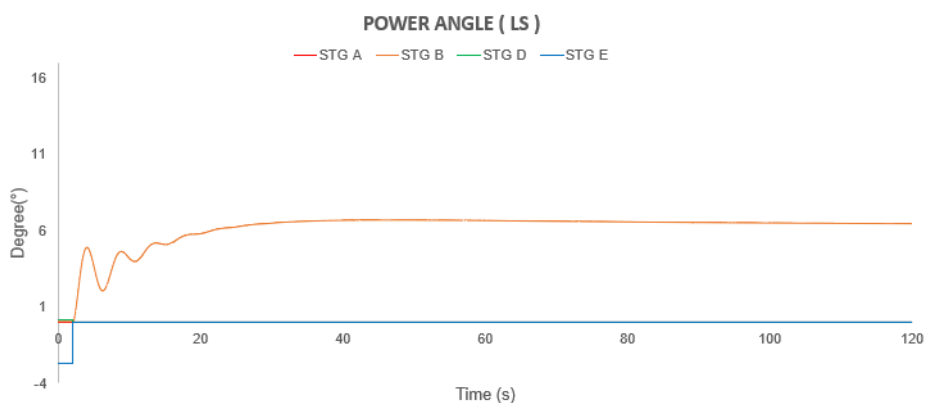
Sehingga ketika *load shedding* telah dilakukan, maka kondisi sistem akan lebih stabil dan daya elektrik masing masing generator mengalami kenaikan 10% dari kondisi normal operasinya. Hal ini bertujuan agar masing-masing generator yang masih beroperasi tidak bekerja terlalu maksimal ketika terjadinya gangguan STG E trip dan tidak mengalami panas berlebih.



Gambar 4.24 Respon Sudut Rotor STG lainnya sebelum mengalami STG E dan D Trip



Gambar 4.25 Respon Sudut Rotor STG lainnya setelah mengalami STG E dan D Trip tanpa LS



Gambar 4.26 Respon Sudut Rotor STG lainnya setelah mengalami STG E dan D Trip dengan LS

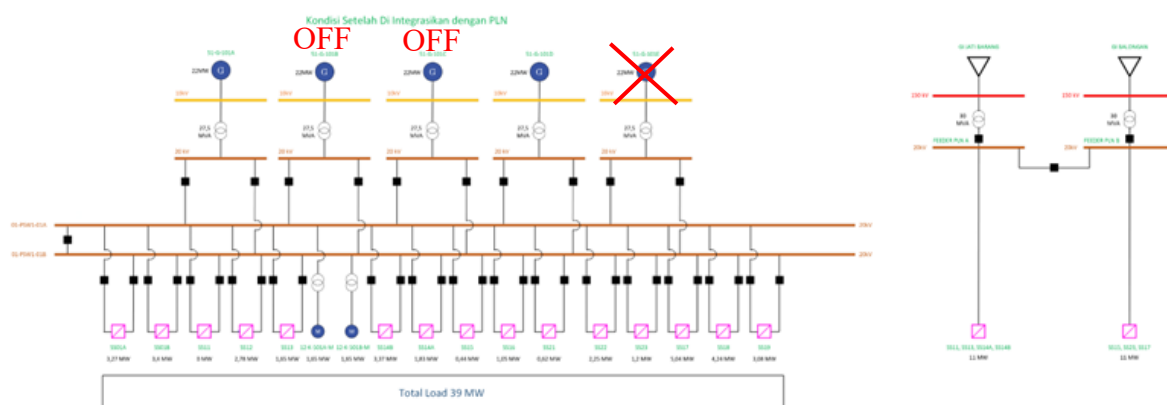
Tabel 4.15 Data Respon Sudut Rotor STG lainnya

Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	0,05	OFF	0,15	-2,69
Tanpa LS	Steady State (MW)	0	45,18	OFF	0	0
LS	Steady State (MW)	0	6,45	OFF	0	0

Berdasarkan gambar respons sudut rotor pada pola operasi 4 Generator aktif lalu mengalami *accidental tripping* pada STG E dan STG D, dapat diamati perbandingan antara kondisi sebelum dan sesudah *load shedding*. Data hasil simulasi yang dilakukan selama 120s menunjukkan bahwa masing-masing generator mengalami osilasi tidak melebihi 180°. Akan tetapi, hal tersebut tidak direkomendasikan dalam sistem kelistrikan, karena osilasi pada sudut rotor yang berlebihan dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem kelistrikan, serta dapat menyebabkan generator *loss of synchron* yang berakibat sistem blackout.

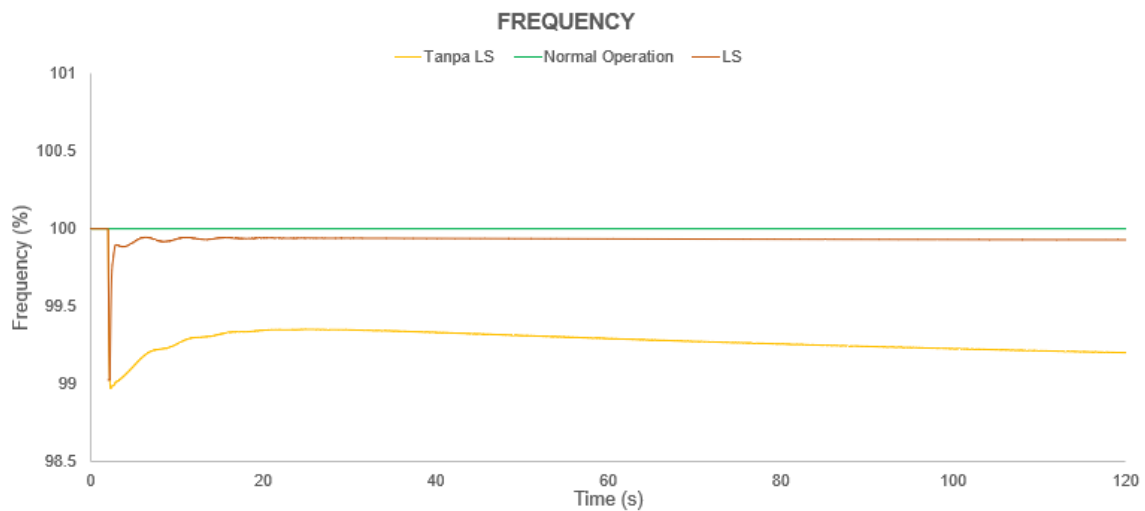
Ketika belum dilakukannya *load shedding*, sudut rotor STG B mengalami kenaikan yang cukup signifikan, yang sebelumnya berada di 0,05° menjadi 45,18°. Pada STG A memiliki nilai sudut rotor 0° karena bekerja dengan mode swing generator atau referensi mesin. Sehingga dari hasil simulasi yang sudah dilakukan dapat dianalisis bahwa ketika terjadinya generator STG E dan STG D trip, maka untuk menjaga keandalan sistem perlu dilakukan *load shedding*.

4.4.1.3 Pola Operasi 3 Generator (51-G-101 B dan C Off): 51-G-101 E Trip



Gambar 4.27 Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip

Pada skenario dengan pola operasi 3 generator beroperasi, dengan studi kasus generator STG 51-G-101 E mengalami trip. Analisis kestabilan ini dilakukan pada detik ke 2, dengan total durasi simulasi 120 detik. Parameter yang akan diamati adalah frekuensi sistem, daya mekanis dan elektrik pada STG, sudut rotor, dan tegangan sistem yang masing-masing akan ditunjukkan. Berikut ini merupakan respons dari sistem yang dihasilkan.



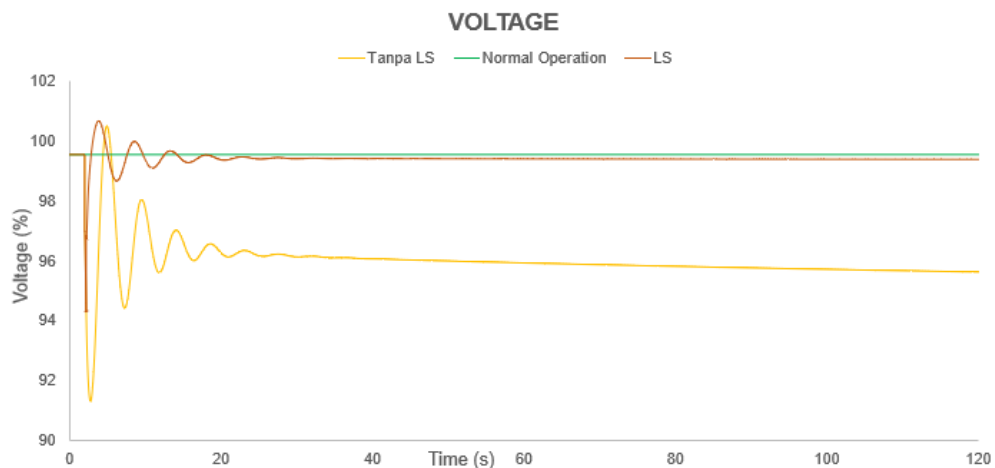
Gambar 4.28 Respon Frekuensi pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip

Tabel 4.16 Data Respon Frekuensi pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Tanpa LS	98,97	100	99,20
LS	99,02	100	99,92

Berdasarkan hasil simulasi dan respon frekuensi dengan pola operasi 3 generator aktif dengan studi kasus generator STG 51-G-101 E mengalami trip pada detik ke-2, ketika generator mengalami trip, respon frekuensi pada detik pertama mengalami guncangan atau osilasi sesaat dan dapat kembali ke posisi steady dalam waktu yang cepat. Hal ini disebabkan karena generator lain yang masih beroperasi berusaha untuk memberikan supply daya yang hilang ketika STG E mengalami *accidental tripping*.

Setelah dilakukannya load shedding pada kasus ini, maka dapat dilihat respon frekuensi yang dihasilkan pada salah satu main *double busbar* pembangkit masih stabil dan dapat dikatakan aman.



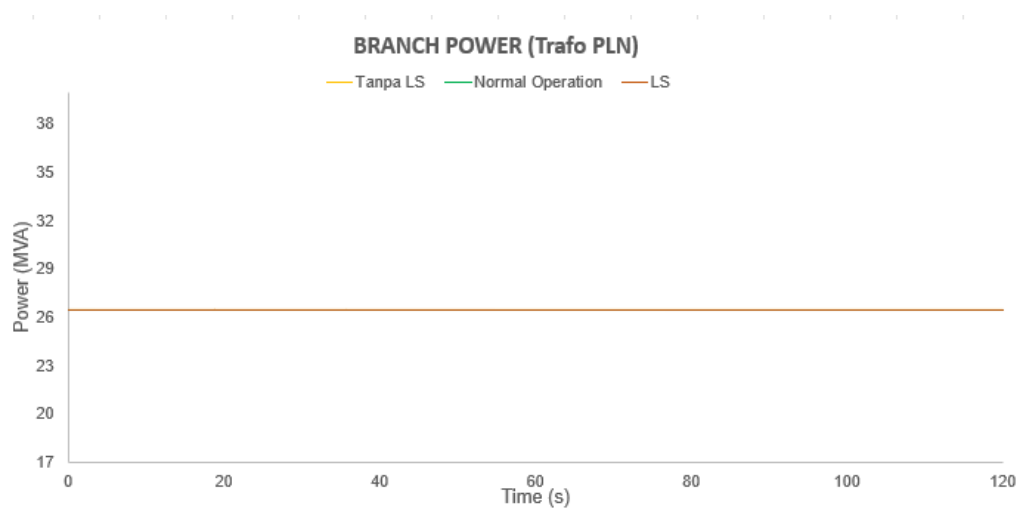
Gambar 4.29 Respon Tegangan pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip

Berdasarkan hasil simulasi dan respon tegangan dengan pola operasi 3 generator aktif dengan studi kasus generator STG 51-G-101 E mengalami trip pada detik ke-2, respon tegangan pada salah satu main double busbar mengalami penurunan hingga mencapai 91,3% dan naik steady di 95%. Walaupun begitu, kondisi ini masih berada dalam batas standard yang mengacu pada standard IEEE 1159-2019.

Skema pelepasan beban menggunakan metode status menunjukkan respon yang cukup baik dan waktu yang diperlukan sistem untuk kembali pada keadaan steady state / *continuous operation*. Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.

Tabel 4.17 Data Respon Tegangan pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip

Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	99,6	99,6	99,6
Tanpa LS	91,3	100,51	95,63
LS	94,33	100,68	99,41



Gambar 4.30 Respon Daya Trafo PLN pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip

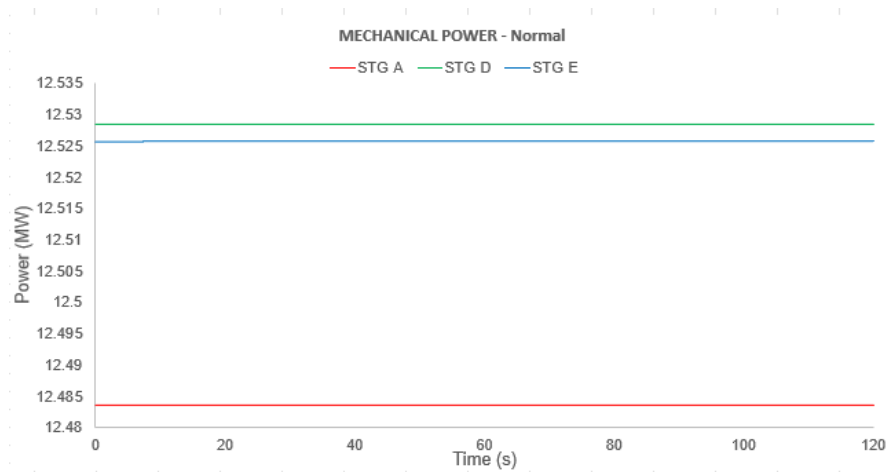
Tabel 4.18 Data Respon Daya Trafo PLN pada Pola Operasi 3 Generator dan STG E Trip

Skema	Branch Power (MVA)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	26,45	26,46	26,45
Tanpa LS	26,452	26,453	26,452
LS	26,45	26,46	26,45

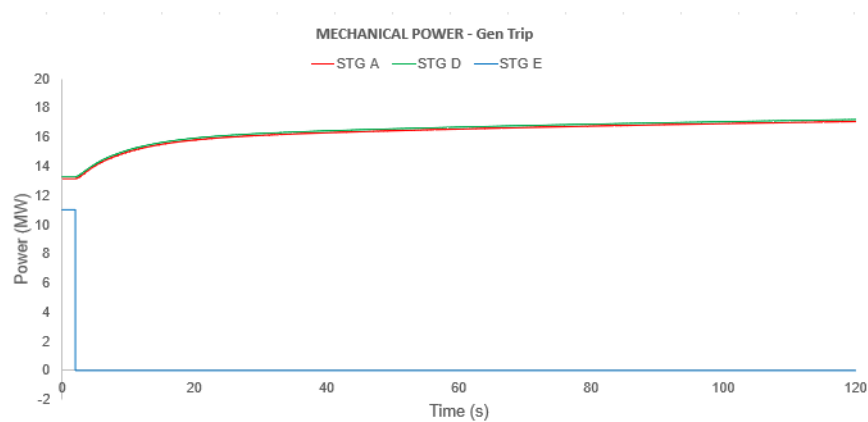
Berdasarkan hasil simulasi dan respon trafo PLN dengan pola operasi 3 generator aktif dengan studi kasus generator STG 51-G-101 E mengalami trip pada detik ke-2, dapat diamati bahwa tidak terjadinya lonjakan daya yang signifikan saat terjadinya STG E Trip ketika PLN tidak disambungkan ke beban pembangkit. Hal ini disebabkan karena PLN dan Pembangkit

tidak bisa saling sinkron sehingga ketika dua STG trip maka PLN akan tetap menyuplai daya dalam kondisi normal.

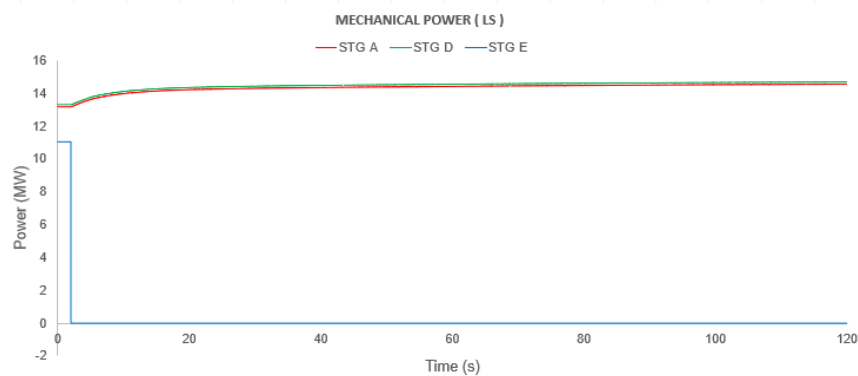
Setelah dilakukannya load shedding, respon trafo PLN yang dihasilkan menunjukkan hasil yang baik dan masih dalam batas kondisi aman, Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.31 Respon Daya Mekanik sebelum terjadinya STG E Trip



Gambar 4.32 Respon Daya Mekanik setelah terjadinya STG E Trip tanpa LS



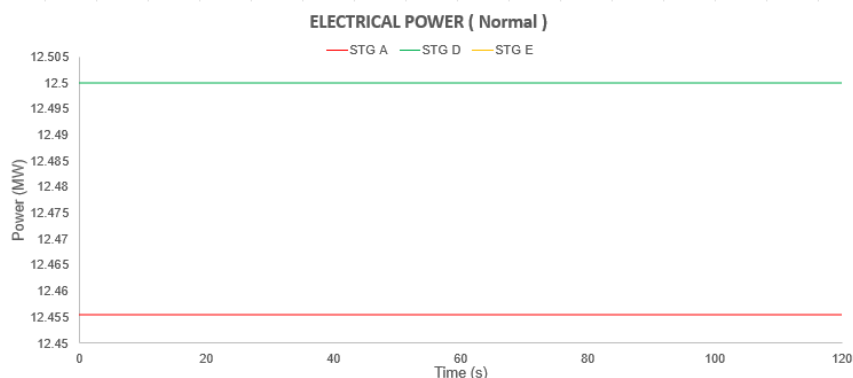
Gambar 4.33 Respon Daya Mekanik setelah terjadinya STG E Trip dengan LS

Tabel 4.19 Data Respon Daya Mekanik pada STG lainnya

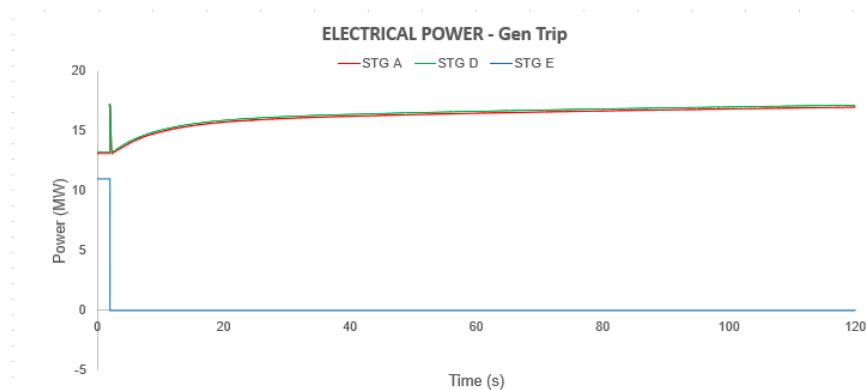
Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,484	OFF	OFF	12,529	12,526
Tanpa LS	Steady State (MW)	17,06	OFF	OFF	17,91	0
LS	Steady State (MW)	14,55	OFF	OFF	14,69	0

Berdasarkan hasil simulasi dan respon daya mekanik dengan pola operasi 3 generator aktif dengan studi kasus generator STG 51-G-101 E mengalami trip pada detik ke-2, maka generator lainnya mengalami kenaikan hingga mencapai 17 – 18 MW. STG cukup lama untuk melakukan *ramp up* sehingga kondisi ini tentu dapat membahayakan sistem.

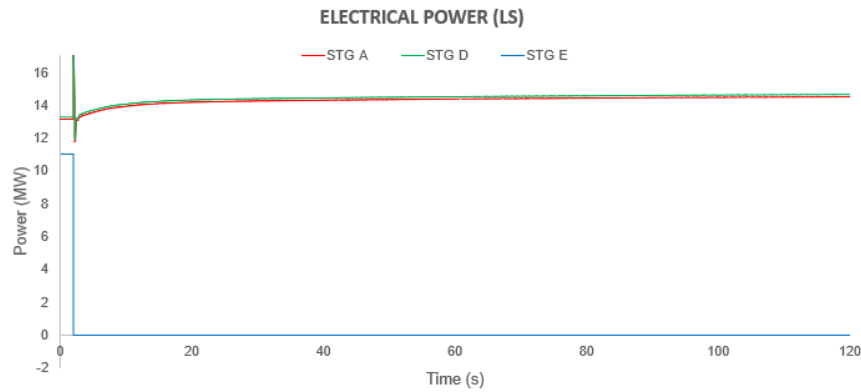
Ketika dilakukan mitigasi *load shedding* maka respon daya mekanik dari STG A dan D mengalami kenaikan hingga 10%. Hal ini bertujuan agar generator yang masih aktif tidak bekerja terlalu keras dan tidak mengalami panas yang berlebih ketika terjadinya kasus STG E Trip.



Gambar 4.34 Respon Daya Elektrik sebelum terjadinya STG E Trip



Gambar 4.35 Respon Daya Elektrik setelah terjadinya STG E Trip tanpa LS



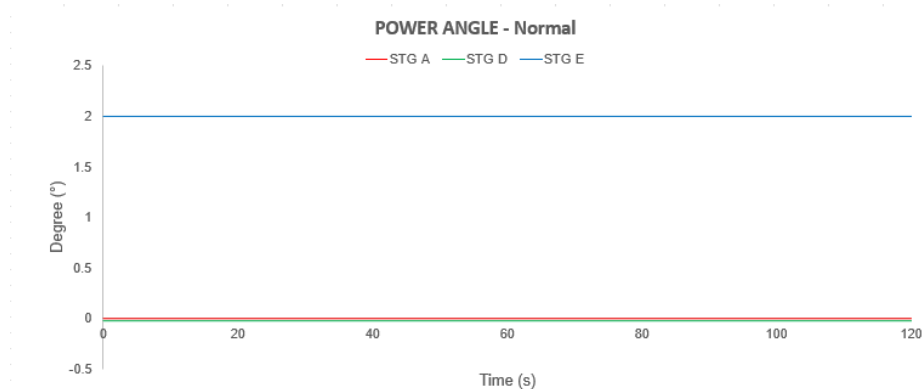
Gambar 4.36 Respon Daya Elektrik setelah terjadinya STG E Trip dengan LS

Tabel 4.20 Respon Daya Elektrik STG Lainnya

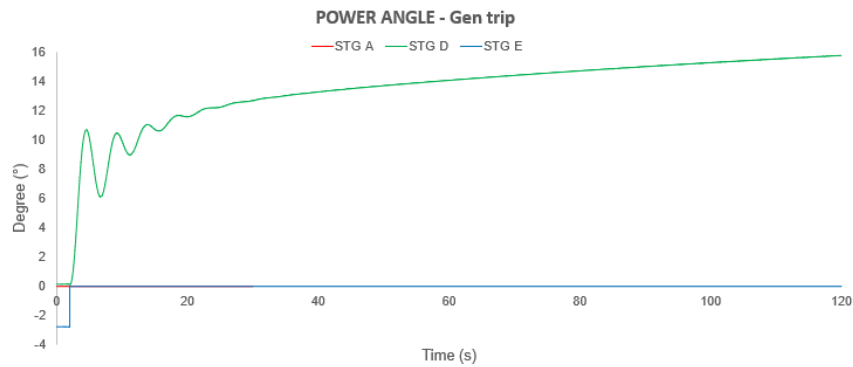
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,456	OFF	OFF	12,5	12,5
Tanpa LS	Steady State (MW)	16,98	OFF	OFF	17,15	0
LS Status	Steady State (MW)	14,51	OFF	OFF	14,65	0

Setelah dilakukannya simulasi pada kasus pola operasi 3 generator aktif, dengan studi kasus generator STG 51-G-101 E mengalami trip pada detik ke 2, dapat respon daya elektrik pada masing-masing pembangkit mengalami kenaikan yang cukup signifikan dan membuat generator harus bekerja lebih keras. Sedangkan ramp up yang di izinkan pada masing-masing pembangkit adalah sebesar 10-15% agar generator dapat terjaga keandalannya dan dapat mencegah panas berlebih pada sisi pembangkit. Oleh karena itu, diperlukan untuk melakukan skema load shedding pada kondisi ini.

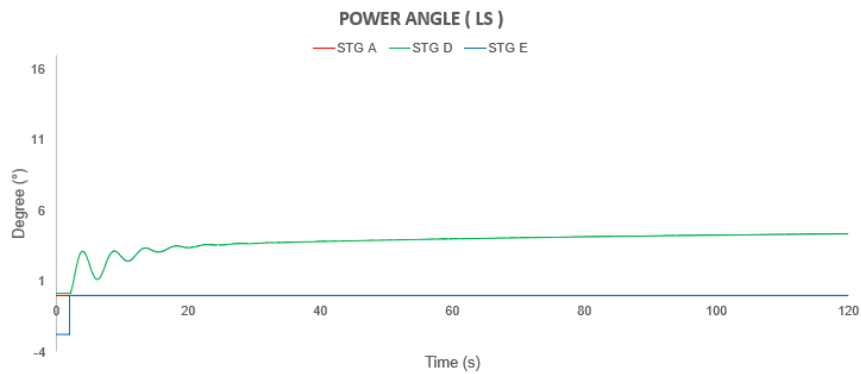
Setelah dilakukannya metode skema pelepasan beban status, respon yang dihasilkan oleh daya mekanik pada masing-masing pembangkit mengalami kenaikan 10% . Hal ini menunjukkan bahwa sistem sudah memiliki keandalan yang baik dalam mengatasi gangguan dan menjaga konsistensi operasionalnya.



Gambar 4.37 Respon Sudut Rotor STG Lainnya sebelum STG E Trip



Gambar 4.38 Respon Sudut Rotor STG Lainnya setelah STG E trip tanpa LS



Gambar 4.39 Respon Sudut Rotor STG Lainnya setelah STG E Trip dengan LS tanpa PLN

Tabel 4.21 Respon Sudut Rotor STG lainnya ketika STG E Trip

Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	-0,023	1,99
Tanpa LS	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	15,74	0
LS Status	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	4,35	0

Setelah dilakukannya simulasi pada kasus pola operasi 3 generator aktif, dengan studi kasus generator STG 51-G-101 E mengalami trip pada detik ke-2, dapat dilihat beberapa respon sudut rotor pada masing-masing pembangkit. Data hasil simulasi yang dilakukan selama 120s menunjukkan bahwa masing-masing generator mengalami osilasi tidak melebihi 180° . Akan tetapi, hal tersebut tidak direkomendasikan dalam sistem kelistrikan, karena osilasi pada sudut rotor yang berlebihan dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem kelistrikan, serta dapat menyebabkan generator *loss of synchron* yang berakibat sistem blackout.

Ketika terjadinya *accidental tripping* pada STG E didetik ke-2, maka nilai sudut rotor STG A bernilai 0° dikarenakan menjadi sudut referensi relative dari generator yang masih menyala. Sedangkan pada STG D, respon sudut rotor yang dihasilkan cukup mengalami kenaikan yang signifikan hingga mencapai 15° .

Dari analisis ini, dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan dapat mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.

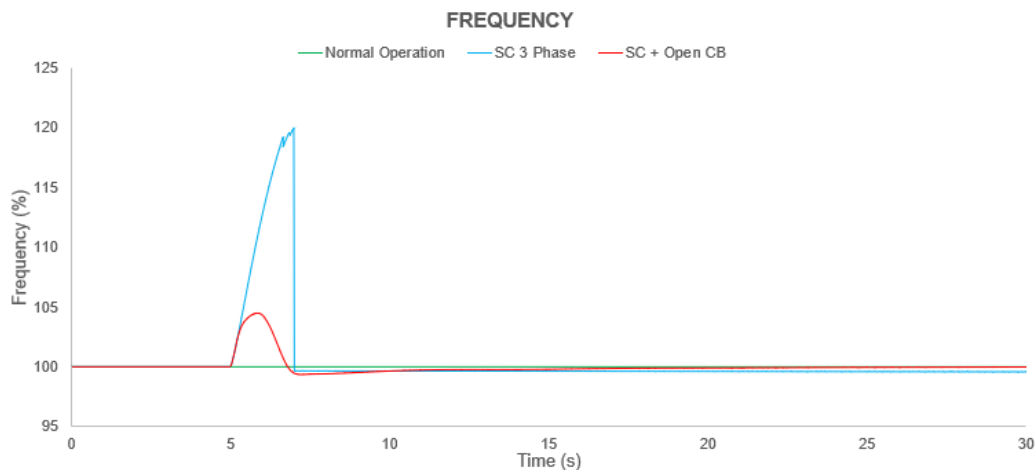
4.4.2 Simulasi Kestabilan Transien Short Circuit

Dalam simulasi kestabilan transien dengan kasus *Short Circuit 3 Phase*, akan dilakukan simulasi pada setiap level tegangan bus yang berbeda yang nantinya akan diwakilkan per masing-masing level tegangan. Konfigurasi sistem yang digunakan adalah konfigurasi kondisi normal, yaitu pengoperasian 4 STG dan 3 STG. Dalam kondisi ini, hubung singkat dilakukan pada detik ke 5, dan sebagai mitigasi gangguan apabila terjadinya hubung singkat 3 phasa, akan dilakukannya pembukaan cb pada detik ke 5,2 s.

Respon parameter pada sistem dilakukan dengan total durasi 30 detik, dengan parameter yang akan diamati adalah frekuensi, tegangan, daya elektrik, daya mekanik, sudut rotor yang akan dianalisis pada main double busbar yang ada pada sisi pembangkit.

4.4.2.1 Pola operasi 4 Generator: Hubung singkat 3 Phase Bus 12-PTR-501A Primary Bus (20 kV)

Pada skenario dengan pola operasi 4 generator aktif, dengan studi kasus bus 20 kV mengalami hubung singkat. Analisis kestabilan ini dilakukan pada detik ke 5, dengan total durasi simulasi 30 detik. Parameter yang akan diamati adalah frekuensi sistem, daya mekanis dan elektrik pada STG, sudut rotor, dan tegangan sistem yang masing-masing akan ditunjukkan Berikut ini merupakan respons dari sistem yang dihasilkan



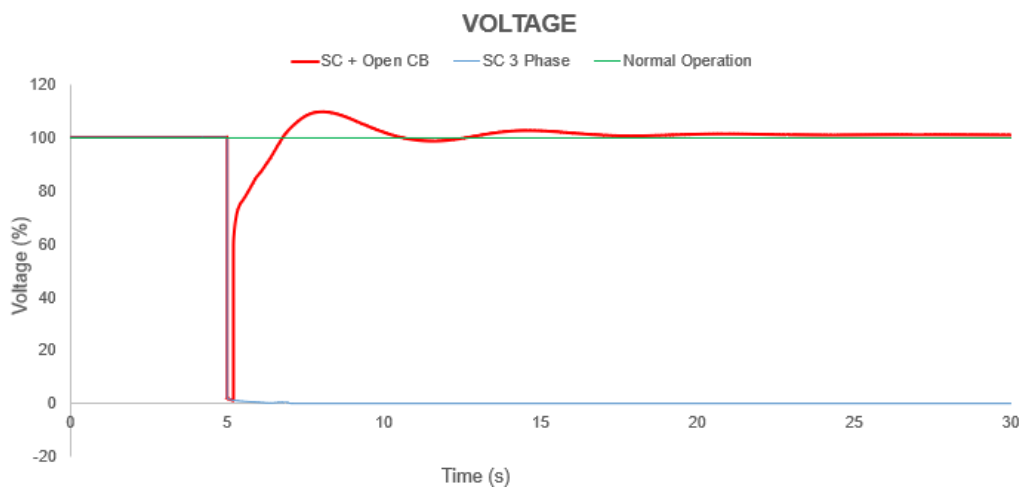
Gambar 4.40 Respon Frekuensi saat mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV

Tabel 4.22 Data Respon Frekuensi saat mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Short Circuit	99,57	119,95	99,57
Open CB	99,34	104,49	99,97

Setelah dilakukannya simulasi pada pola operasi 4 Generator aktif dengan kasus hubung singkat disalah satu perwakilan busbar level tegangan 20 kV, respon frekuensi pada main double busbar menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan. Jika mengacu pada standard IEEE Std. C37.106-2003: *Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*, kondisi ini berada pada zona *prohibited operation* yang merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga frekuensi tidak dizinkan mencapai daerah tersebut. Kenaikan frekuensi secara tiba-tiba dan sesaat ini diakibatkan karena seolah-olah daya mekaniknya mengalami kenaikan sehingga governor mengalami percepatan sehingga frekuensi semakin tinggi.

Ketika dilakukannya pembukaan CB pada detik ke-5,2, maka dapat dilihat respon frekuensi yang dihasilkan tidak mengalami kenaikan yang cukup tinggi dibandingkan sebelum dilakukannya pembukaan CB yang berada didekat gangguan dan kembali dapat beroperasi ke dalam kondisi normal sehingga dapat dikatakan respon frekuensi yang dihasilkan setelah dilakukannya pembukaan CB yang berada didekat gangguan dapat berhasil mengamankan sistem kelistrikan.



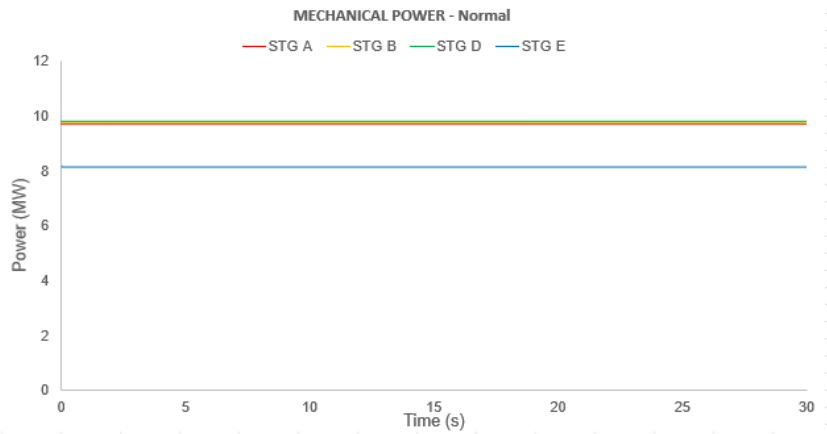
Gambar 4.41 Respon Tegangan saat mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV

Tabel 4.23 Data Respon Tegangan mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV

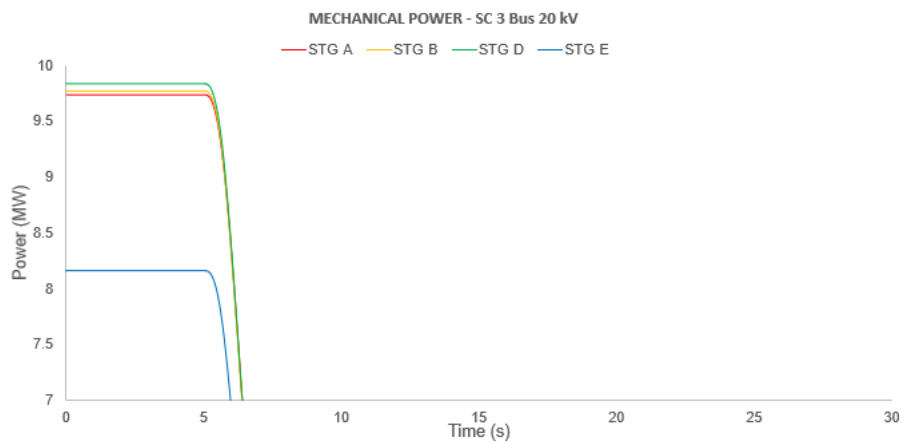
Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100,11	100,11	100,11
Short Circuit	0	100,36	0
Open CB	99,57	119,95	99,57

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada pola operasi 4 Generator aktif di salah satu perwakilan level tegangan 20 kV, respon nilai tegangan yang dihasilkan pada salah satu main *double busbar* menunjukkan penurunan hingga 0%, hal ini dapat menyebabkan arus gangguan yang lewat sangat besar sehingga dapat membahayakan sistem beroperasi.

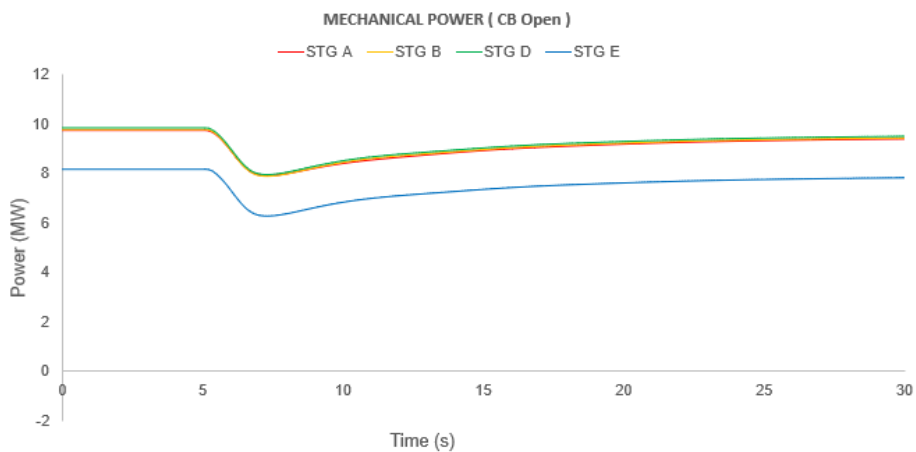
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada detik ke-5,2, maka respon tegangan pada salah satu main double busbar mengalami kenaikan dalam waktu yang singkat dan dapat kembali beroperasi secara normal sesuai dengan standard IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*.



Gambar 4.42 Respon Daya Mekanik Sebelum mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV



Gambar 4.43 Respon Daya Mekanik Setelah mengalami Hubung singkat di Bus 20 kV



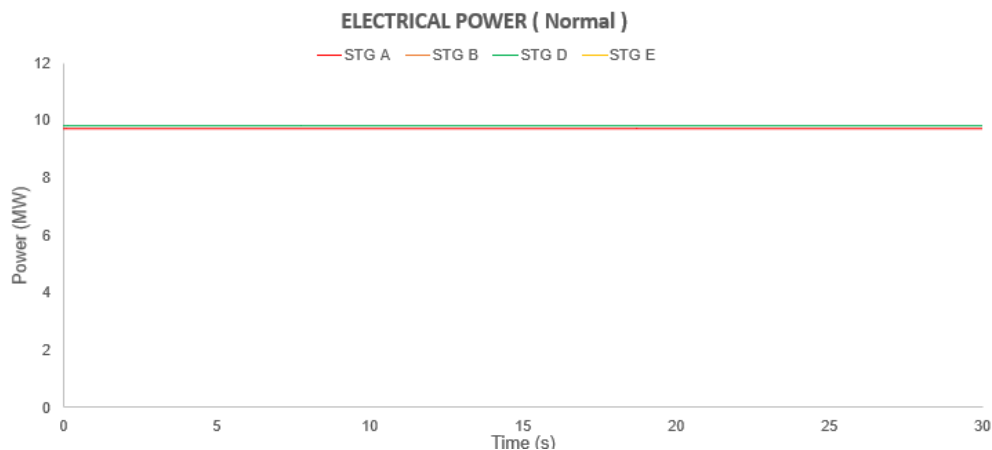
Gambar 4.44 Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya open CB

Tabel 4.24 Data Respon Daya Mekanik lainnya ketika gangguan Hubung singkat di Bus 20 kV

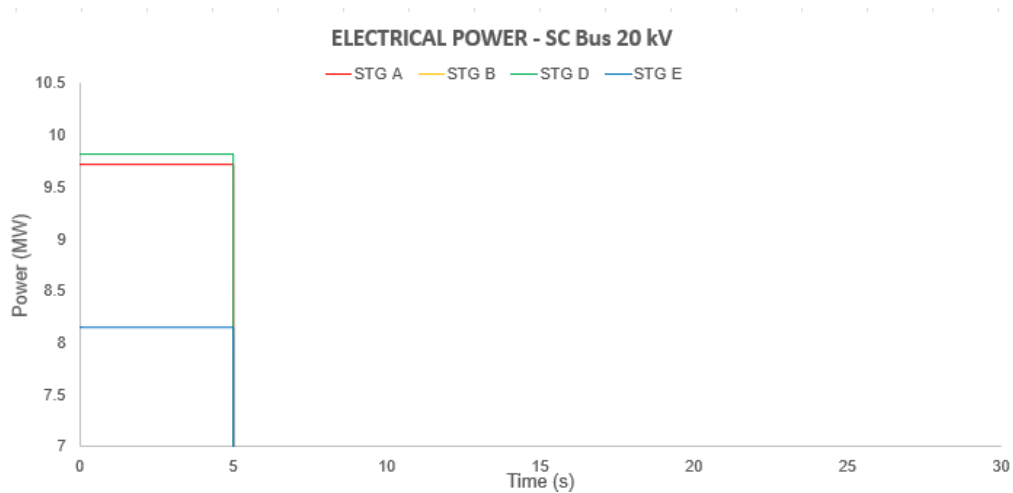
Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Short Circuit	Steady State (MW)	0	0	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	9,38	9,42	OFF	9,49	7,81

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 4 Generator aktif, respon daya mekanik pada masing-masing generator mengalami penurunan hingga mencapai 0%. Hal ini menyebabkan daya mekanik pada generator tidak bekerja sehingga seluruh generator yang beroperasi tidak mengeluarkan daya *supply* dan sistem mengalami *black out*, sehingga diperlukan pembukaan cb didekat gangguan yang sangat cepat agar sistem tidak mengalami *black out* dan gagal beroperasi.

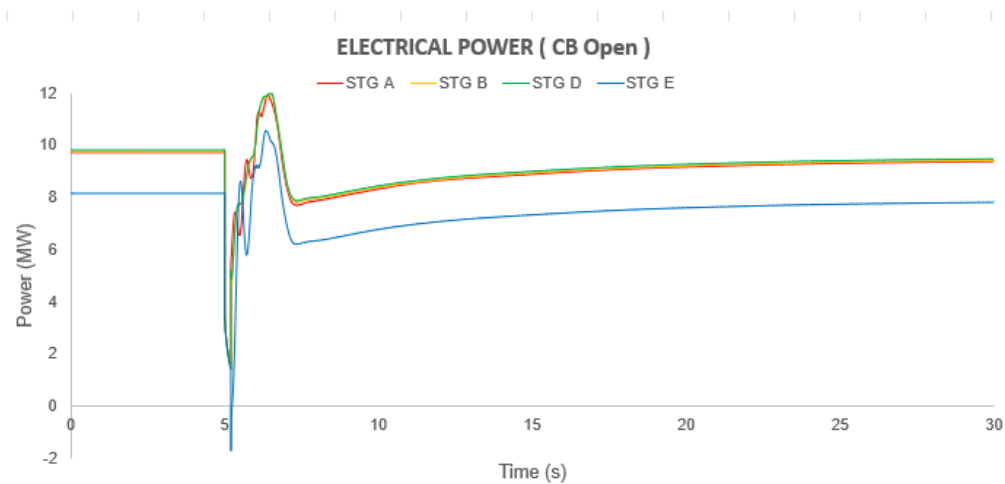
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada salah satu gangguan hubung singkat, dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit menunjukkan penurunan sesaat dan kembali mempertahankan kestabilannya pada detik ke-10, hal ini dapat dikatakan sistem aman dan dapat mempertahankan kondisi kestabilannya.



Gambar 4.45 Respon Daya Elektrik Sebelum mengalami Hubung Singkat di Bus 20 kV



Gambar 4.46 Respon Daya Elektrik Setelah mengalami Hubung singkat di Bus 20 kV



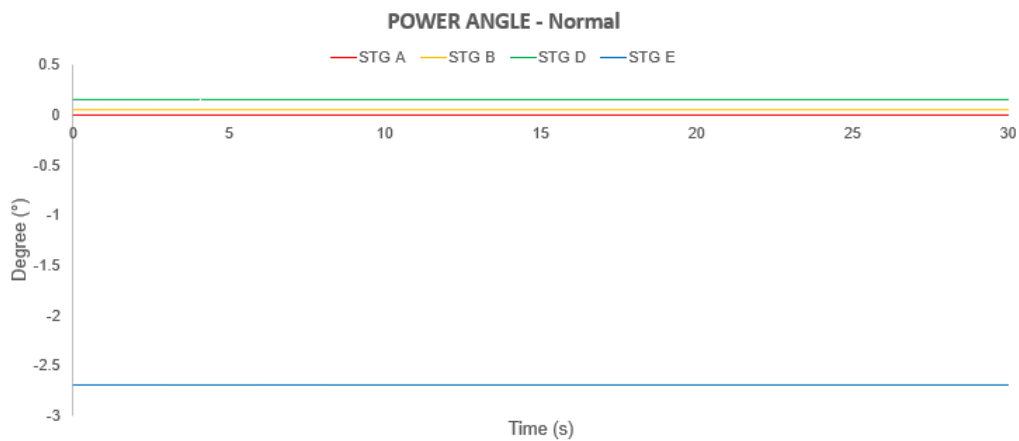
Gambar 4.47 Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya open CB

Tabel 4.25 Data Respon Daya Elektrik lainnya ketika gangguan Hubung singkat Bus 20 kV

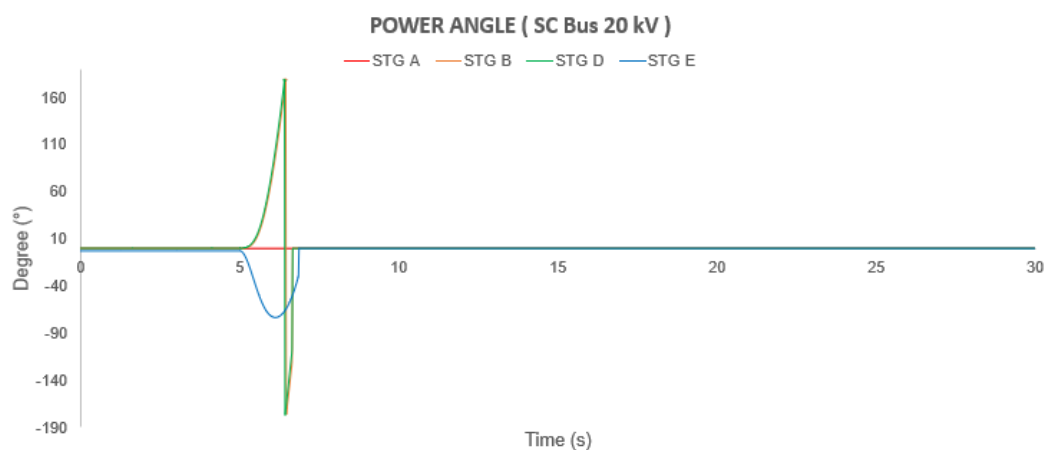
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Short Circuit	Steady State (MW)	0	0	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	9,37	9,4	OFF	9,47	7,80

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 4 Generator aktif, respon daya elektrik pada masing-masing generator mengalami penurunan hingga mencapai 0%. Hal ini menyebabkan daya elektrik pada generator tidak bekerja sehingga seluruh generator yang beroperasi tidak mengeluarkan daya supply dan sistem mengalami *black out*, sehingga diperlukan pembukaan cb didekat gangguan yang sangat cepat agar sistem tidak mengalami *black out* dan gagal beroperasi.

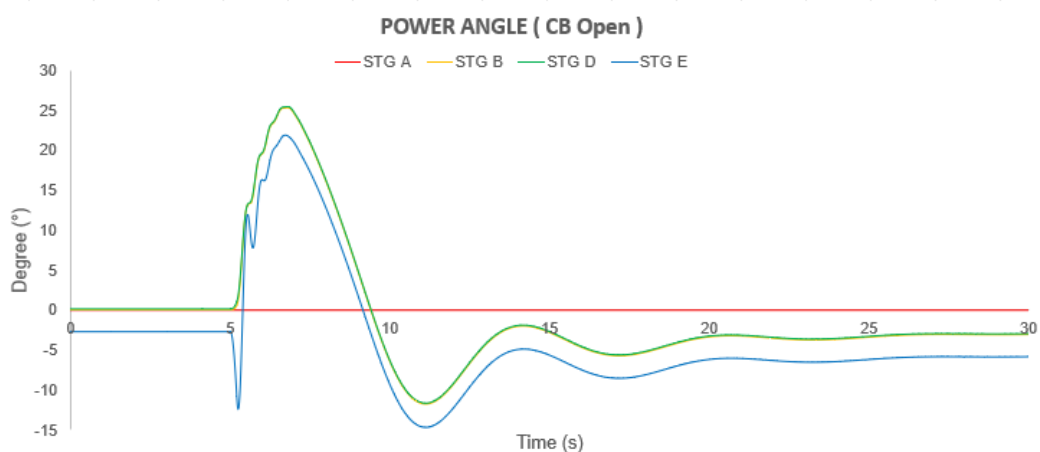
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada salah satu gangguan hubung singkat, dapat dilihat respon daya elektrik pada masing-masing pembangkit menunjukkan penurunan sesaat dan kembali mempertahankan kestabilannya pada detik ke-10, hal ini dapat dikatakan sistem aman dan dapat mempertahankan kondisi kestabilannya



Gambar 4.48 Respon Sudut Rotor Sebelum mengalami gangguan Hubung Singkat 20 kV



Gambar 4.49 Respon Sudut Rotor Setelah mengalami gangguan Hubung Singkat 20 kV



Gambar 4.50 Respon Sudut Rotor Setelah dilakukannya open CB

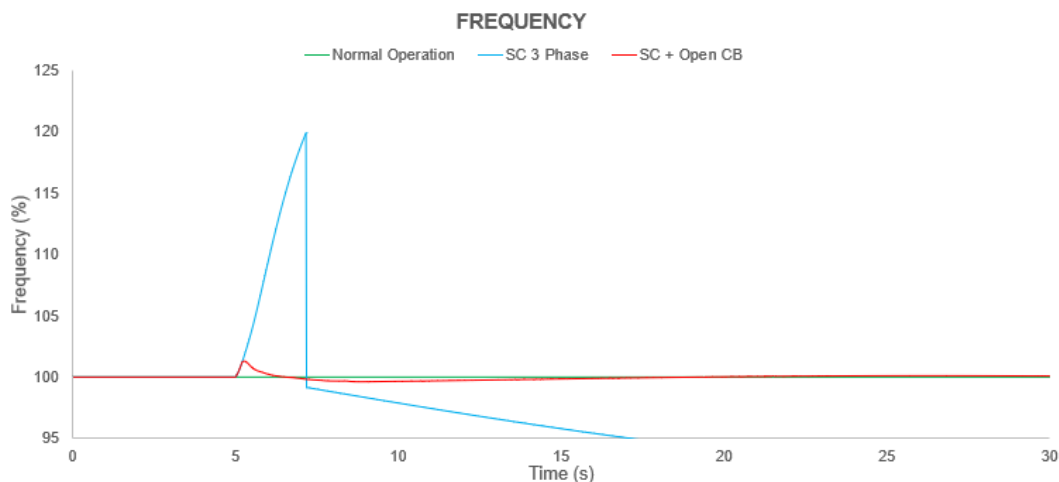
Tabel 4.26 Data Respon Sudut Rotor Lainnya ketika mengalami hubung singkat Bus 20 kV

Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	0,05	OFF	0,15	-2,69
Short Circuit	Steady State (MW)	0	0	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	0	-3,04	OFF	-2,93	-5,81

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 4 Generator aktif pada detik ke-5, respon sudut rotor pada masing-masing pembangkit mengalami penurunan hingga mencapai 0° sehingga seluruh pembangkit mengalami kehilangan sinkronisasinya sehingga generator tidak lagi berputar pada kecepatan dan fase yang sama dengan sistem sehingga dapat menyebabkan kerusakan serius pada pembangkit.

Ketika dilakukannya pembukaan cb di dekat gangguan, maka respon sudut rotor yang dihasilkan oleh masing-masing pembangkit mengalami kenaikan sesaat dan kembali dalam kondisi normalnya. Dapat dikatakan kondisi ini sudah aman karena sistem dapat mempertahankan kestabilannya dan aman ketika beroperasi.

4.4.2.2 Pola operasi 4 Generator: Hubung singkat 3 Phase Bus 51-G-101A BUS (10 kV)



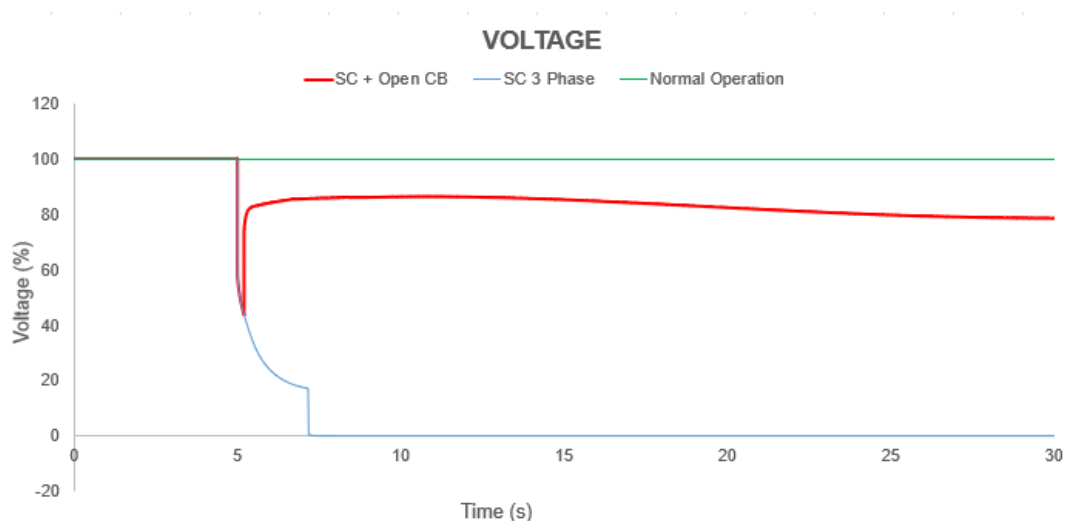
Gambar 4.51 Respon Frekuensi ketika mengalami Hubung Singkat 10 kV

Tabel 4.27 Data Respon Frekuensi ketika mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Short Circuit	91,5	119,88	91,5
Open CB	99,61	101,29	100,09

Setelah dilakukannya simulasi pada pola operasi PLN dan 3 Generator beroperasi dengan kasus hubung singkat disalah satu perwakilan busbar level tegangan 10 kV, respon frekuensi pada *main double busbar* menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan. Jika mengacu pada standard IEEE Std. C37.106-2003: *Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*, kondisi ini berada pada zona *prohibited operation* yang merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga frekuensi tidak diizinkan mencapai daerah tersebut. Kenaikan frekuensi secara tiba-tiba dan sesaat ini diakibatkan karena seolah olah daya mekaniknya mengalami kenaikan sehingga governor mengalami percepatan sehingga frekuensi semakin tinggi. Lalu pada detik ke-7, frekuensi mengalami penurunan hingga mencapai 91,5% dan tidak dapat kembali stabil, hal ini tidak disarankan untuk terjadi karena melihat respon grafik yang semakin menurun akan mengakibatkan kegagalan sistem dalam beroperasi.

Ketika dilakukannya pembukaan CB pada detik ke-5,2, maka dapat dilihat respon frekuensi yang dihasilkan tidak mengalami kenaikan yang cukup tinggi dibandingkan sebelum dilakukannya pembukaan CB yang berada didekat gangguan dan kembali dapat beroperasi ke dalam kondisi normal sehingga dapat dikatakan respon frekuensi yang dihasilkan setelah dilakukannya pembukaan CB yang berada didekat gangguan dapat berhasil mengamankan sistem kelistrikan.



Gambar 4.52 Respon Frekuensi ketika mengalami Hubung Singkat 10 kV

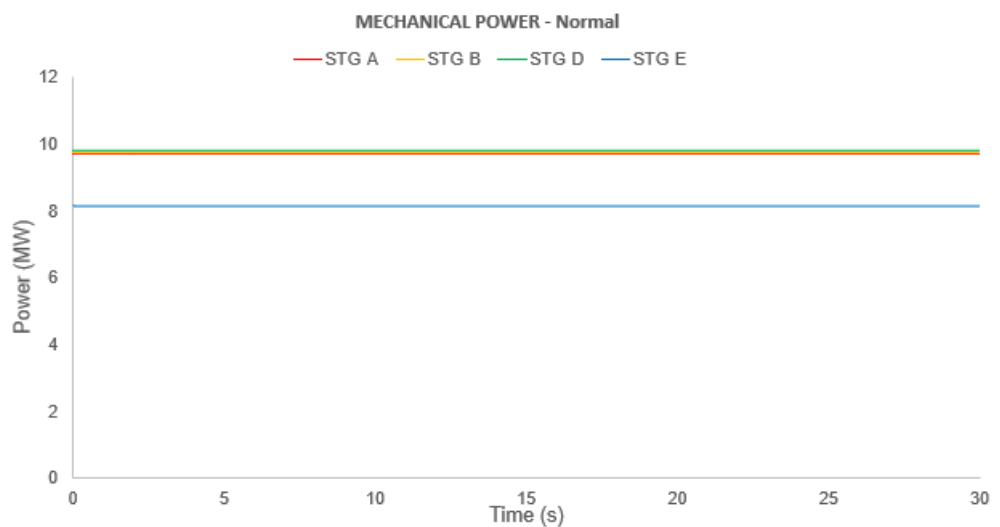
Tabel 4.28 Data Respon Frekuensi ketika mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100,11	100,11	100,11
Short Circuit	0	100,36	0
Open CB	43,94	100,36	78,78

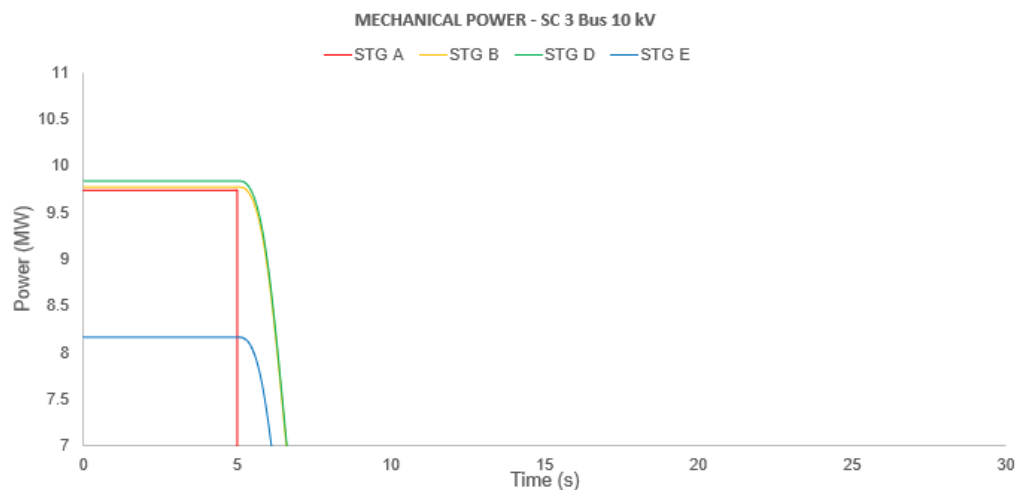
Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada pola operasi 3 Generator aktif di salah satu perwakilan level tegangan 10 kV, respon nilai tegangan yang dihasilkan pada salah satu *main double busbar* menunjukkan penurunan hingga 0%, hal ini dapat menyebabkan arus

gangguan yang lewat sangat besar sehingga dapat membahayakan sistem beroperasi dan mengalami kegagalan.

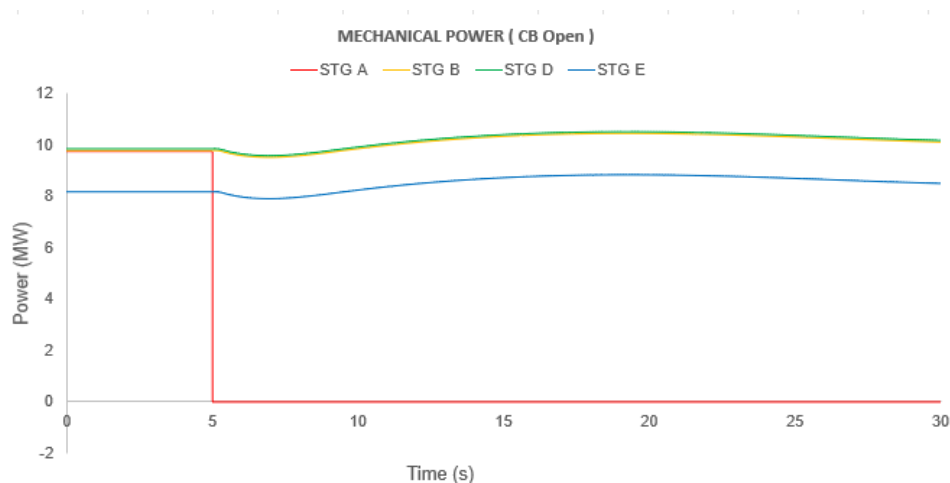
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada detik ke-5,2, maka respon tegangan pada salah satu main double busbar mengalami penurunan sesaat dan kembali naik dan steady pada kondisi 78,78% dan tidak dapat kembali beroperasi secara normal sesuai dengan standard *IEEE Std 1159-2019 Voltage Magnitude Event*. Hal ini disebabkan karena sistem mengalami kekurangan daya yang disupply oleh salah satu pembangkit, karena dalam kondisi ini dapat dikatakan terjadinya tripping generator STG A akibat adanya gangguan hubung singkat sehingga tentunya diperlukan mitigasi *load shedding* pada kasus ini. Untuk contoh mitigasi ketika satu STG trip, sudah dijelaskan pada halaman sebelumnya.



Gambar 4.53 Respon Daya Mekanik sebelum mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV



Gambar 4.54 Respon Daya Mekanik setelah mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV



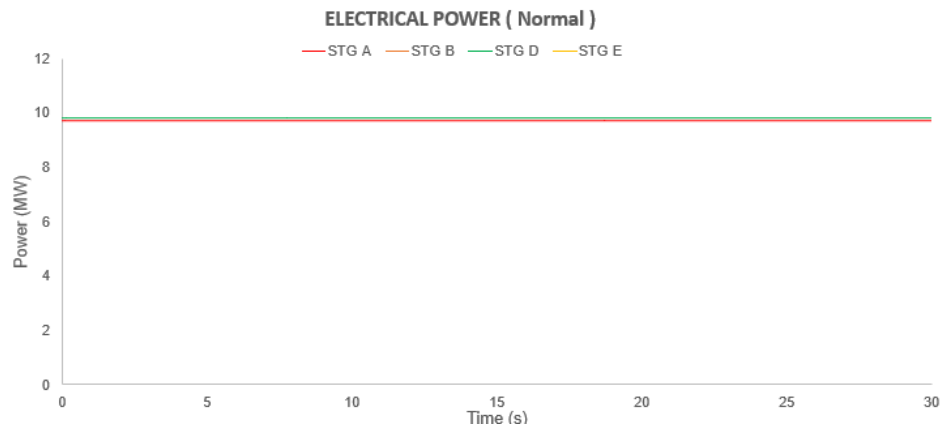
Gambar 4.55 Respon Daya Mekanik setelah dilakukannya mitigasi Open CB

Tabel 4.29 Data Respon Daya Mekanik STG Lainnya ketika hubung singkat Bus 10 kV

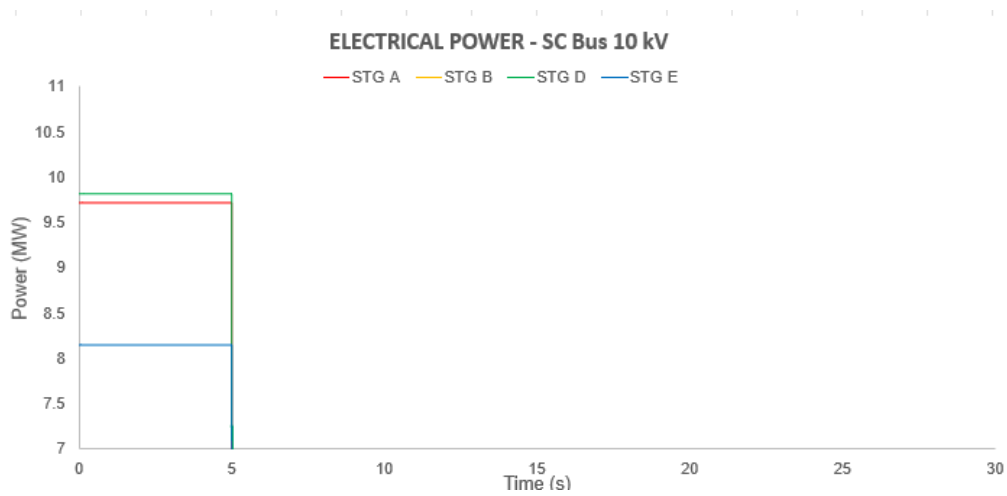
Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Short Circuit	Steady State (MW)	0	0	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	0	10,09	OFF	10,15	8,48

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 4 Generator aktif pada detik ke-5, respon daya mekanik pada masing-masing generator mengalami penurunan hingga mencapai 0%. Hal ini menyebabkan daya mekanik pada generator tidak bekerja sehingga seluruh generator yang beroperasi tidak mengeluarkan daya supply dan sistem mengalami *black out*, sehingga diperlukan pembukaan cb didekat gangguan yang sangat cepat agar sistem tidak mengalami *black out* dan gagal beroperasi.

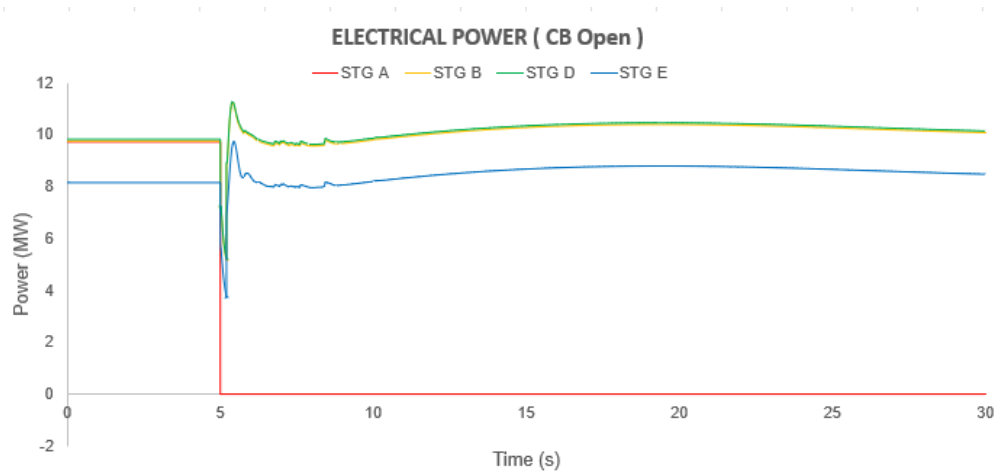
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada salah satu gangguan hubung singkat, dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit menunjukkan penurunan sesaat dan kembali mempertahankan kestabilannya pada detik ke-10, hal ini dapat dikatakan sistem aman dan dapat mempertahankan kondisi kestabilannya hanya saja perlu diperhatikan daya yang hilang masih belum bisa dibackup oleh generator lainnya sehingga diperlukannya skema *load shedding* agar sistem tetap dapat berada dalam kondisi normalnya. Untuk contoh mitigasi ketika satu STG trip, sudah dijelaskan pada halaman sebelumnya.



Gambar 4.56 Respon Daya Elektrik sebelum mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV



Gambar 4.57 Respon Daya Elektrik setelah mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV



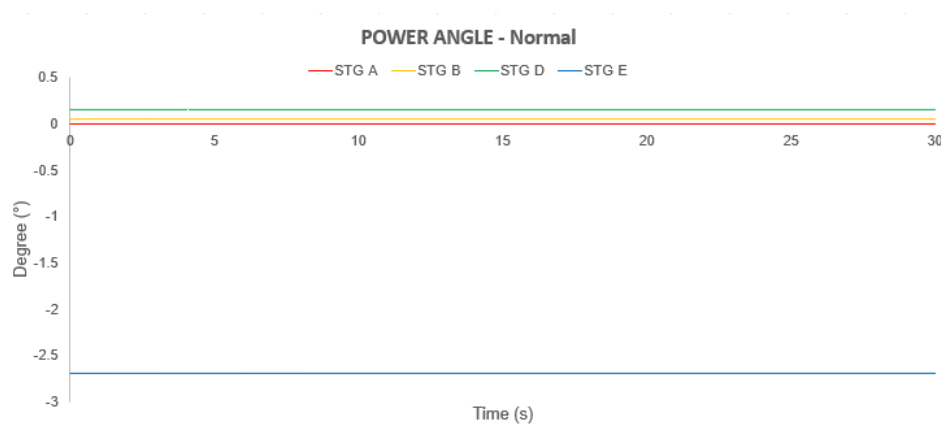
Gambar 4.58 Respon Daya Elektrik setelah dilakukannya mitigasi Open CB

Tabel 4.30 Data Respon Daya Elektrik STG Lainnya ketika Hubung Singkat 10 kV

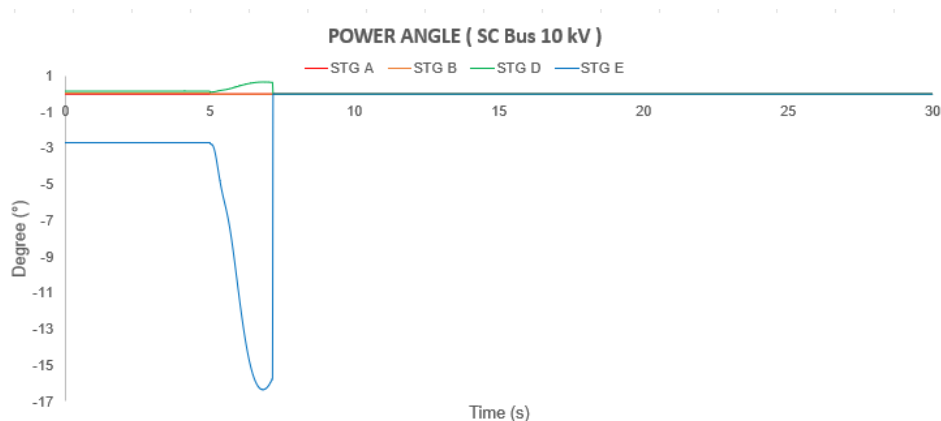
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Short Circuit	Steady State (MW)	0	0	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	0	10,07	OFF	10,13	8,47

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 4 Generator aktif pada detik ke-5, respon daya elektrik pada masing-masing generator mengalami penurunan hingga mencapai 0%. Hal ini menyebabkan daya elektrik pada generator tidak bekerja sehingga seluruh generator yang beroperasi tidak mengeluarkan daya supply dan sistem mengalami *black out*, sehingga diperlukan pembukaan cb didekat gangguan yang sangat cepat agar sistem tidak mengalami *black out* dan gagal beroperasi.

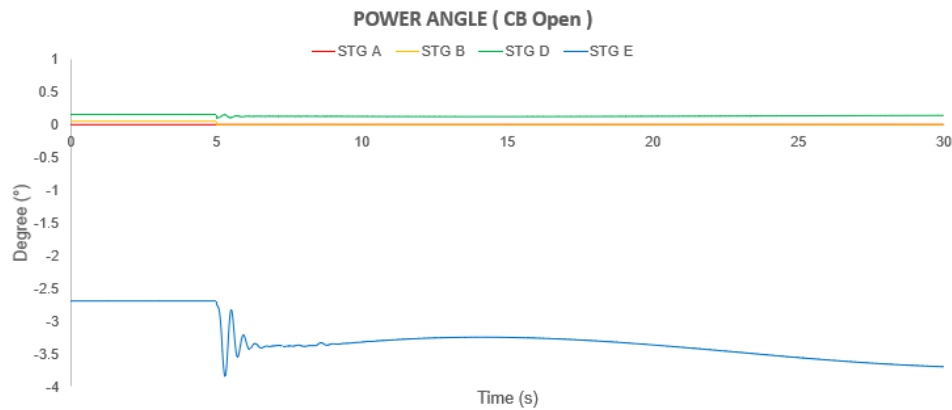
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada salah satu gangguan hubung singkat, dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit menunjukkan penurunan sesaat dan kembali mempertahankan kestabilannya pada detik ke-10, hal ini dapat dikatakan sistem aman dan dapat mempertahankan kondisi kestabilannya hanya saja perlu diperhatikan daya yang hilang masih belum bisa dibackup oleh generator lainnya sehingga diperlukannya skema *load shedding* agar sistem tetap dapat berada dalam kondisi normalnya. Untuk contoh mitigasi ketika satu STG trip, sudah dijelaskan pada halaman sebelumnya.



Gambar 4.59 Respon Sudut Rotor sebelum mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV



Gambar 4.60 Respon Sudut Rotor setelah mengalami gangguan hubung singkat Bus 10 kV



Gambar 4.61 Respon Sudut Rotor setelah dilakukannya mitigasi Open CB

Tabel 4.31 Data Respon Sudut Rotor Lainnya ketika Hubung Singkat 10 kV

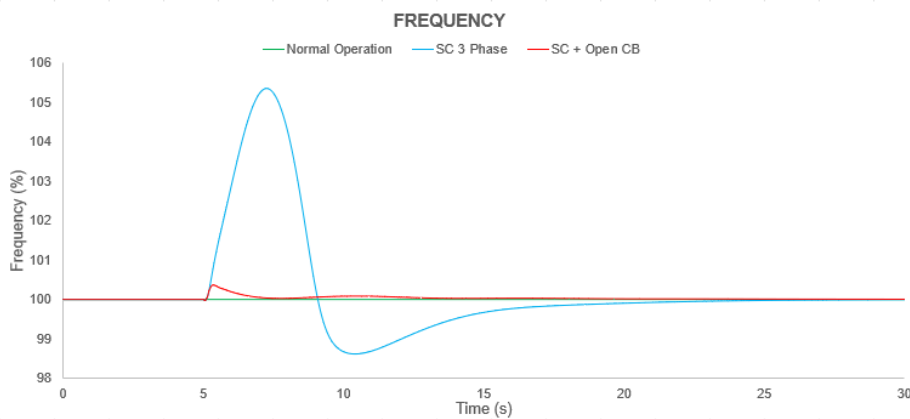
Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	0,05	OFF	0,15	-2,69
Short Circuit	Steady State (MW)	0	0	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	0	0	OFF	0,14	-3,69

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat di detik ke-5 dengan pola operasi 4 generator aktif, maka dapat dianalisis beberapa hal, respon sudut tegangan STG A yang bernilai 0° disebabkan karena STG A menjadi sudut referensi perhitungan relative untuk generator lainnya. Dalam sistem kelistrikan, sudut rotor biasanya diukur relatif terhadap referensi tertentu. Sedangkan sudut rotor pembangkit lainnya mengalami kegagalan dan kehilangan sinkronisasinya dengan sistem. Hal ini tentu tidak diperbolehkan karena akan berdampak buruk bagi sistem dan generator lainnya tidak dapat membackup daya yang hilang akibat adanya gangguan pada STG A.

Ketika dilakukannya pembukaan CB, dapat dilihat referensi 0 derajat diubah dari STG A ke generator STG B, maka sudut rotor generator lain yang beroperasi dalam sistem tersebut juga akan berubah. Oleh sebab itu beberapa generator mengalami perubahan sudut rotor. Perubahan yang terjadi masih berada dalam batas yang di izinkan dimana STG E mengalami osilasi sesaat dan dapat kembali stabil dan mempertahankan sinkronisasinya.

4.4.2.3 4 Generator: Hubung singkat 3 Phase Bus 01-PMC2-02B (3,15 kV)

Pada skenario dengan pola operasi 4 generator aktif, dengan studi kasus bus 3,15 kV mengalami hubung singkat. Analisis kestabilan ini dilakukan pada detik ke 5, dengan total durasi simulasi 30 detik. Parameter yang akan diamati adalah frekuensi sistem, daya mekanis dan elektrik pada STG, sudut rotor, dan tegangan sistem yang masing-masing akan ditunjukkan Berikut ini merupakan respons dari sistem yang dihasilkan



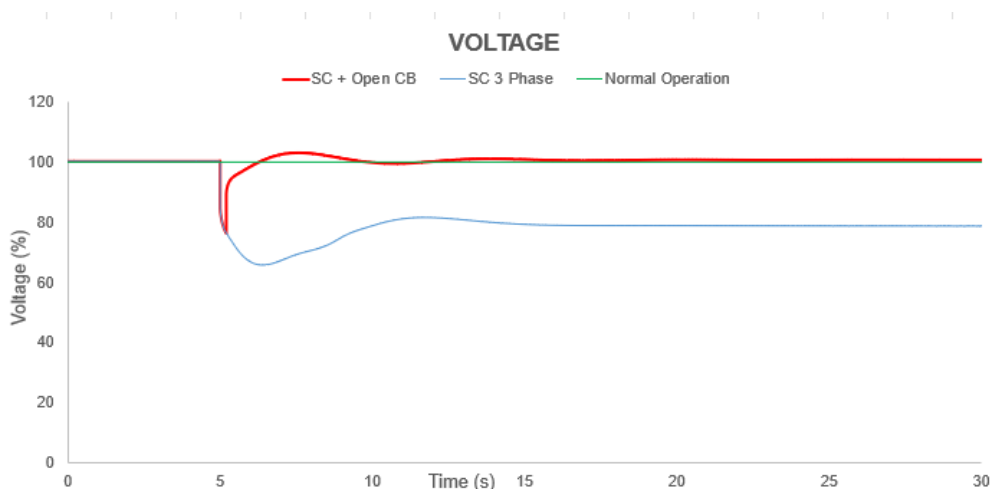
Gambar 4.62 Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

Tabel 4.32 Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat 3,15 kV

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Short Circuit	98,61	105,35	99,99
Open CB	99,97	100,37	100,01

Ketika terjadinya hubung singkat pada bus 01-PMC2-02B pada detik ke-5, dapat dilihat respon frekuensi pada salah satu *main double busbar* pada sisi pembangkit mengalami kenaikan yang cukup besar tapi dapat kembali ke keadaan normal yang membutuhkan waktu 15 detik sampai benar-benar berada pada kondisi *continuous operation*.

Setelah dilakukannya pembukaan cb yang berada pada dekat arah gangguan, maka dapat dilihat respon frekuensi pada *main double busbar* pada sisi pembangkit tidak mengalami kenaikan yang cukup besar karena cb berhasil mengamankan sistem pada detik ke-5,2, juga waktu yang dibutuhkan frekuensi untuk kembali ke dalam *continuous operation* begitu singkat sehingga skema ini dapat dikatakan aman. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



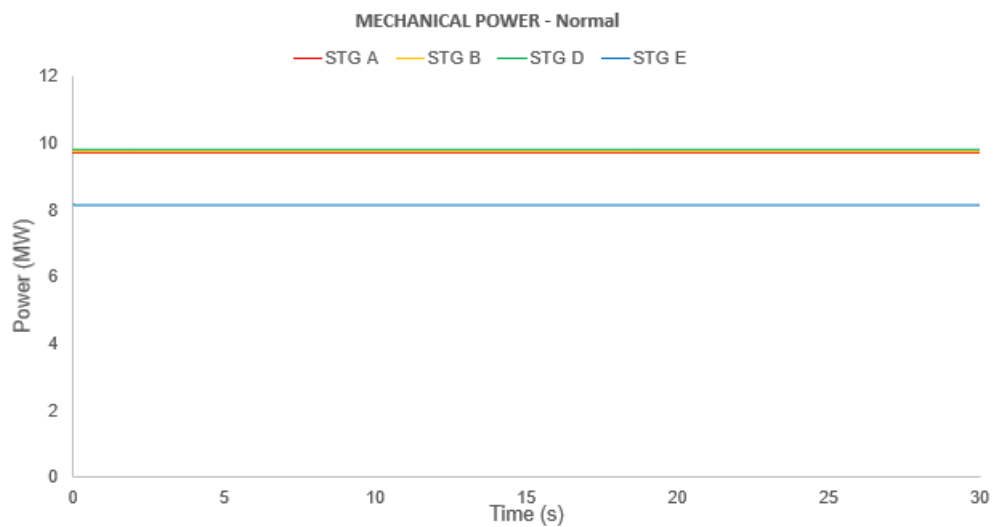
Gambar 4.63 Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat 3,15 kV

Tabel 4.33 Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat 3,15 kV

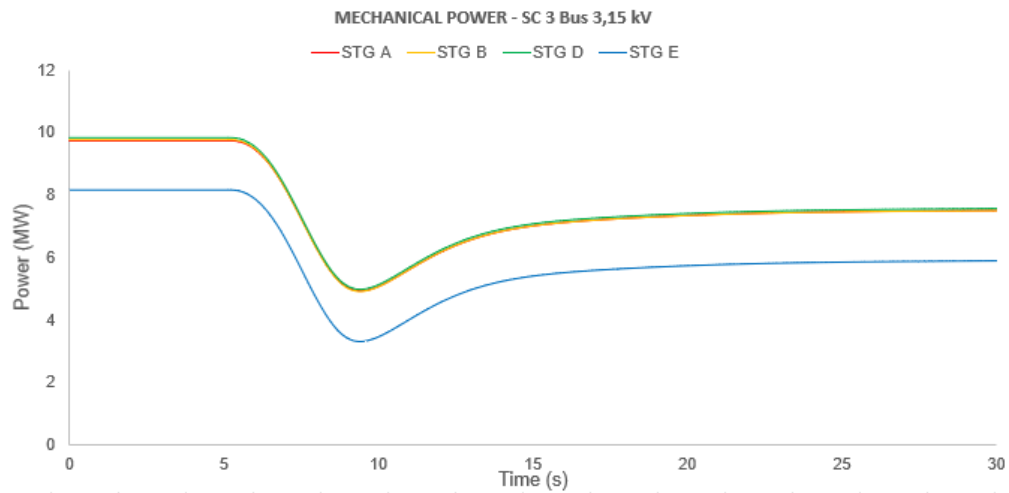
Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100,11	100,11	100,11
Short Circuit	65,82	100,36	78,79
Open CB	98,61	105,35	99,99

Ketika terjadinya hubung singkat pada bus 01-PMC2-02B pada detik ke-5, dapat dilihat respon tegangan pada salah satu *main double busbar* pada sisi pembangkit mengalami penurunan yang cukup signifikan, dan steady pada angka 78,79%. Berdasarkan standar IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*, kondisi ini masih belum bisa dikatakan aman karena respon yang dihasilkan berada dibawah standard yang seharusnya yakni dibawah 90%.

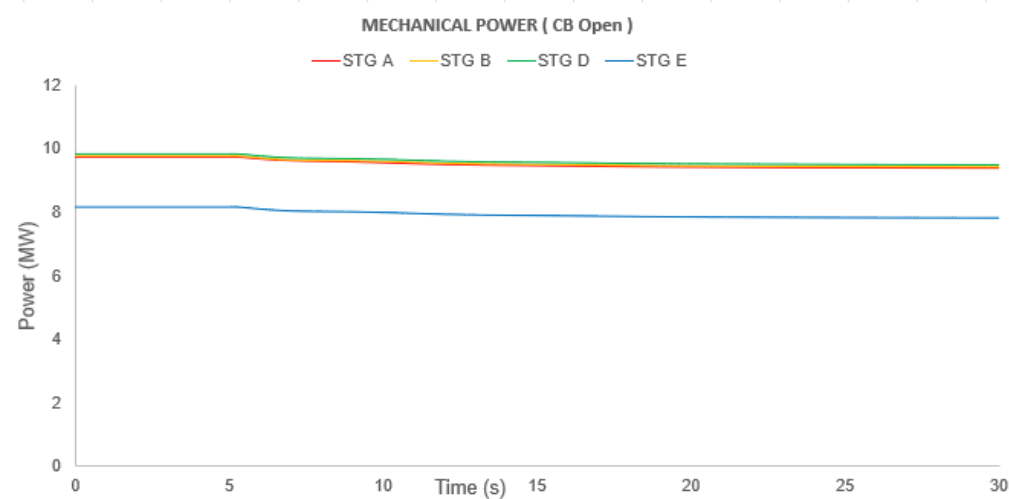
Setelah dilakukannya pembukaan cb yang berada pada dekat arah gangguan, maka dapat dilihat respon tegangan pada main double busbar pada sisi pembangkit tidak mengalami penurunan yang cukup signifikan dan dapat kembali kedalam kondisi normal dalam waktu yang singkat. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.64 Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.65 Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.66 Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

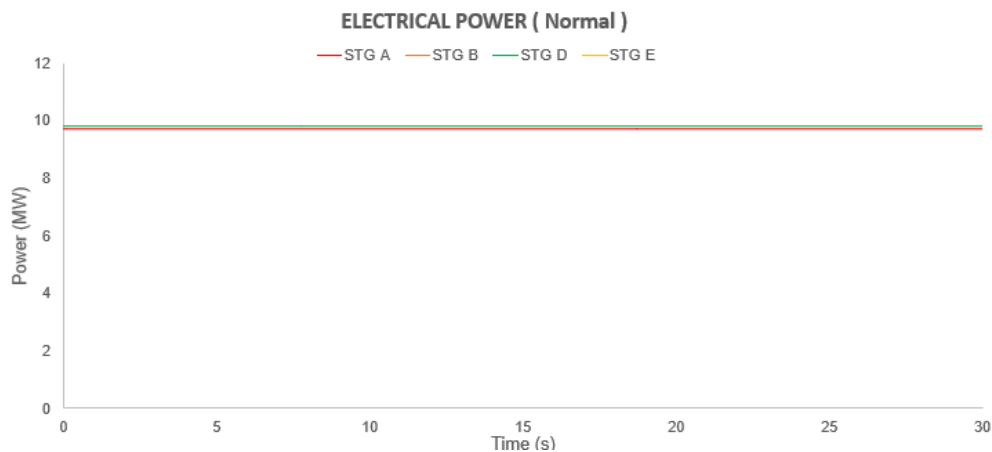
Tabel 4.34 Data Respon Daya Mekanik STG ketika Hubung Singkat 3,15 kV

Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Short Circuit	Steady State (MW)	7,5	7,49	OFF	7,56	5,89
Open CB	Steady State (MW)	9,38	9,42	OFF	9,49	7,81

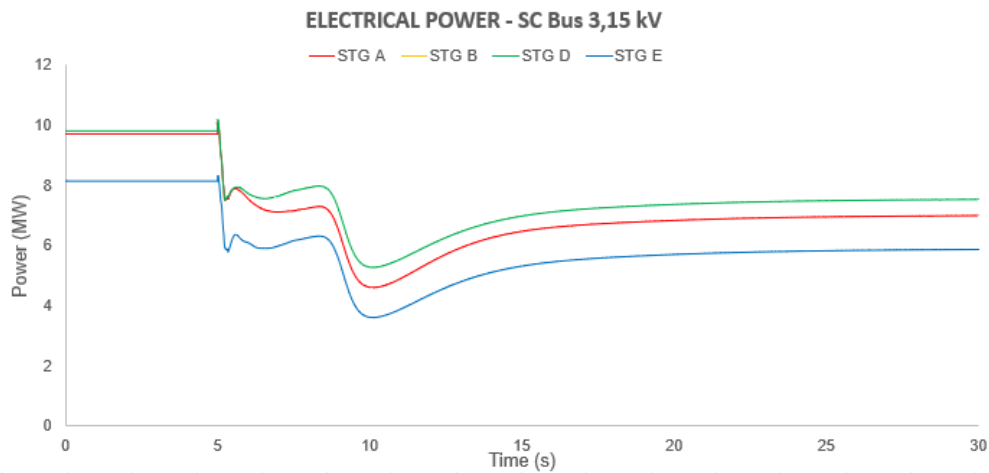
Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada bus 3,15 kV, maka respon daya mekanik pada setiap pembangkit yang beroperasi mengalami penurunan, apabila hal ini dibiarkan maka akan berdampak kepada sistem dimana daya yang dibutuhkan oleh sistem tidak terpenuhi sehingga perlu dilakukannya mitigasi pembukaan cb secepat mungkin agar sistem tetap dapat terjaga kestabilannya. Dapat dilihat ketika terjadinya gangguan daya mekanik pada

masing masing pembangkit mengalami penurunan dan mulai kembali naik didetik 10, hal ini tentu saja dapat berisiko bagi sistem.

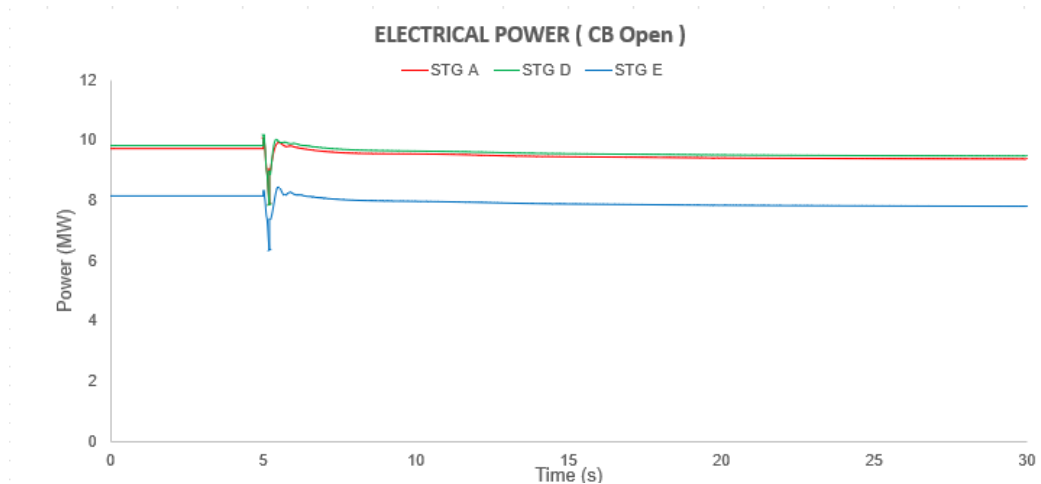
Setelah dilakukannya pembukaan cb di detik 5,2 setelah gangguan, maka dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit dapat kembali ke dalam kondisi normal dengan waktu yang lebih singkat. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.67 Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.68 Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



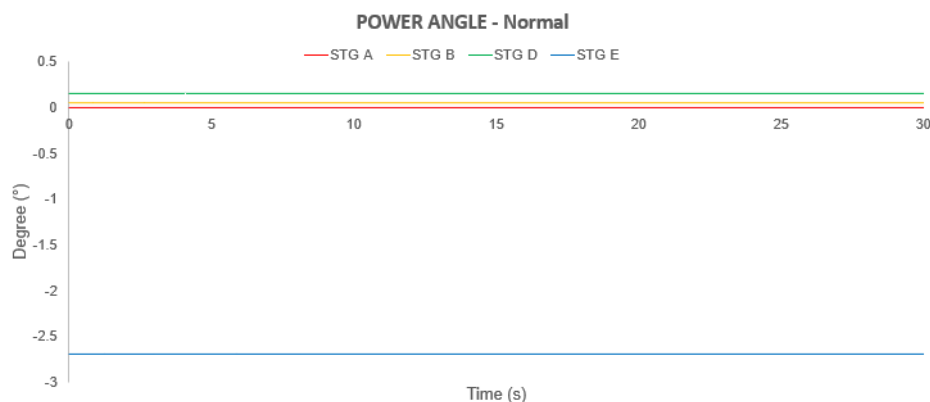
Gambar 4.69 Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.35 Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

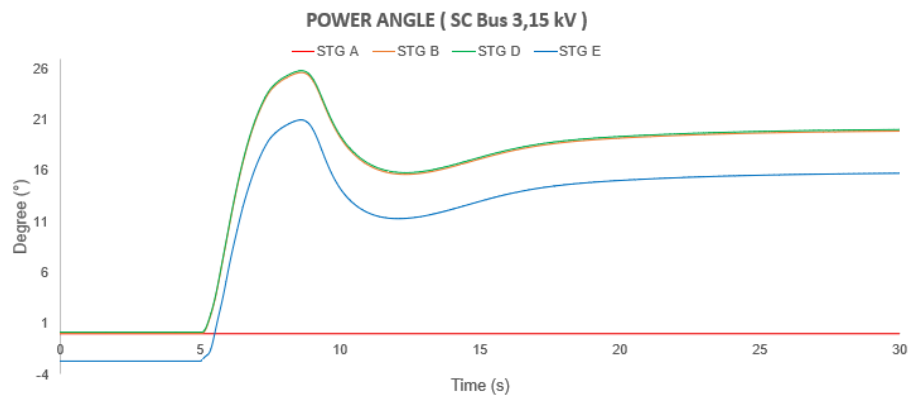
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Short Circuit	Steady State (MW)	7	7,47	OFF	7,54	5,87
Open CB	Steady State (MW)	9,37	9,4	OFF	9,47	7,8

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada bus 3,15 kV, maka respon daya elektrik pada setiap pembangkit yang beroperasi mengalami penurunan, apabila hal ini dibiarkan maka akan berdampak kepada sistem dimana daya yang dibutuhkan oleh sistem tidak terpenuhi sehingga perlu dilakukannya mitigasi pembukaan cb secepat mungkin agar sistem tetap dapat terjaga kestabilannya. Dapat dilihat ketika terjadinya gangguan daya elektrik pada masing masing pembangkit mengalami penurunan dan mulai kembali naik didetik 10, hal ini tentu saja dapat berisiko bagi sistem.

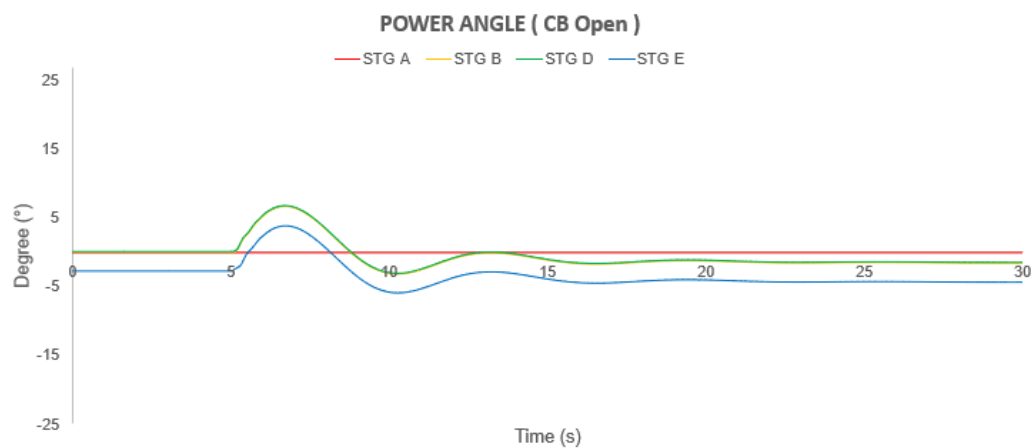
Setelah dilakukannya pembukaan cb di detik 5,2 setelah gangguan, maka dapat dilihat respon daya elektrik pada masing-masing pembangkit dapat kembali ke dalam kondisi normal dengan waktu yang lebih singkat. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.70 Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.71 Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.72 Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.36 Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	0,05	OFF	0,15	-2,69
Short Circuit	Steady State (MW)	0	19,89	OFF	20,05	15,75
Open CB	Steady State (MW)	0	-1,52	OFF	-1,42	-4,31

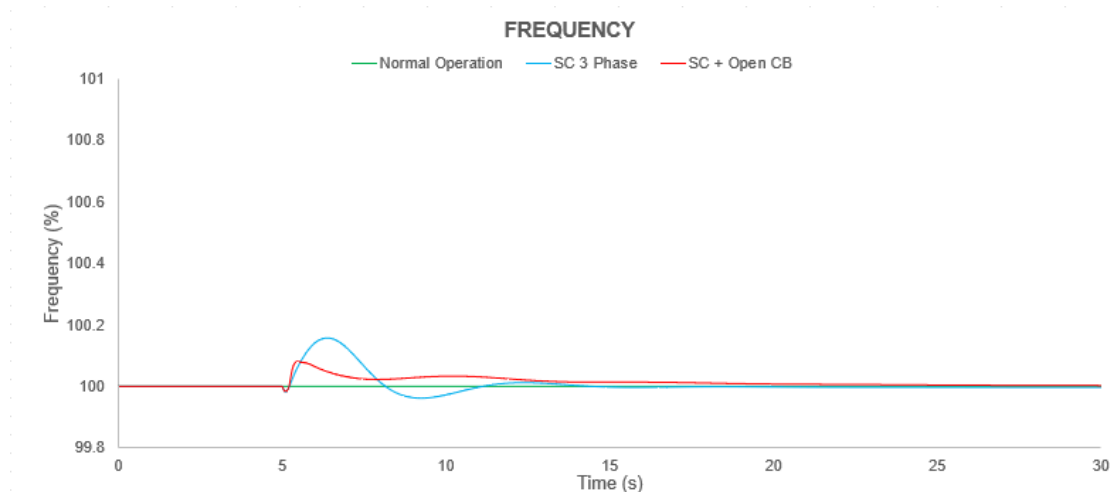
Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase, dapat dilihat sudut rotor masing-masing generator mengalami kenaikan yang cukup signifikan,

Lalu selanjutnya ketika dilakukan pembukaan cb pada detik ke-5,2, maka dapat dilihat respon sudut rotor masing-masing generator dapat kembali turun dan stabil kembali dalam keadaan normal operasi. Dengan adanya mitigasi pembukaan cb yang cepat ini dapat

disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.

4.4.2.4 4 Generator: Hubung Singkat 3 Phase Bus 3-1 (0,42 kV)

Pada skenario dengan pola operasi 4 generator aktif, dengan studi kasus bus 0,42 kV mengalami hubung singkat. Analisis kestabilan ini dilakukan pada detik ke 5, dengan total durasi simulasi 30 detik. Parameter yang akan diamati adalah frekuensi sistem, daya mekanis dan elektris pada STG, sudut rotor, dan tegangan sistem yang masing-masing akan ditunjukkan Berikut ini merupakan respons dari sistem yang dihasilkan.



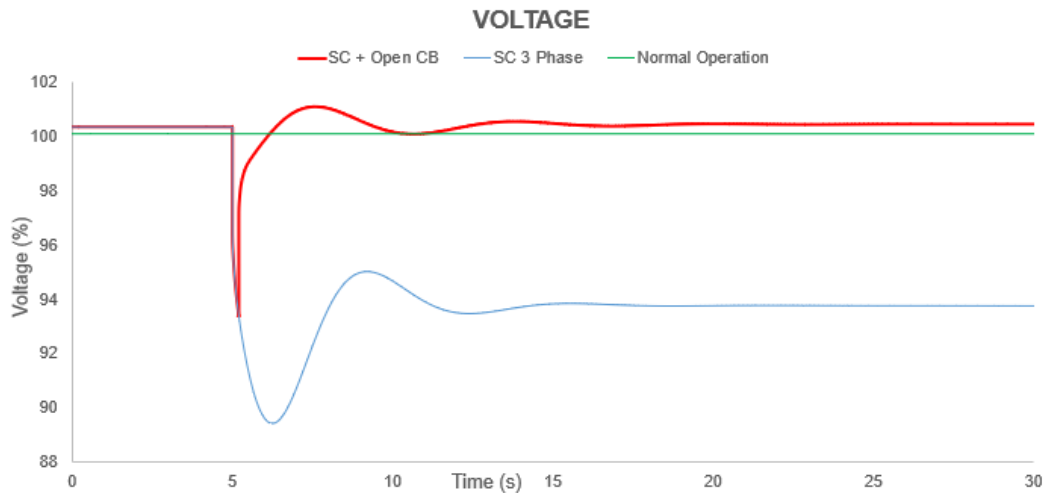
Gambar 4.73 Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

Tabel 4.37 Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Short Circuit	99,96	100,16	99,99
Open CB	99,98	100,08	100

Ketika terjadinya hubung singkat pada bus Bus 3-1 pada detik ke-5, dapat dilihat respon frekuensi pada salah satu main double busbar pada sisi pembangkit mengalami kenaikan yang cukup besar tapi dapat kembali ke keadaan normal yang membutuhkan waktu yang cukup lama sampai benar benar berada pada kondisi *continuous operation*.

Setelah dilakukannya pembukaan cb yang berada pada dekat arah gangguan, maka dapat dilihat respon frekuensi pada *main double busbar* pada sisi pembangkit tidak mengalami kenaikan yang cukup besar karena cb berhasil mengamankan sistem pada detik ke-5,2, juga waktu yang dibutuhkan frekuensi untuk kembali ke dalam *continuous operation* begitu singkat sehingga skema ini dapat dikatakan aman. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



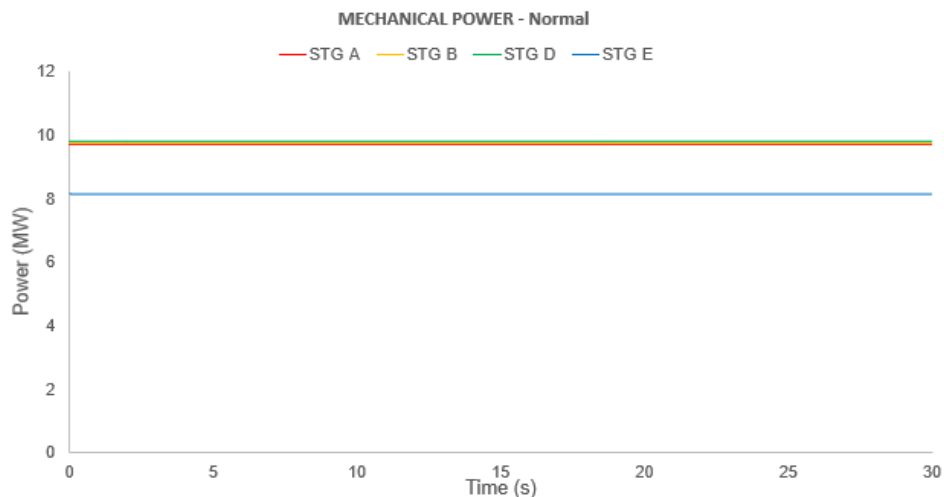
Gambar 4.74 Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

Tabel 4.38 Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

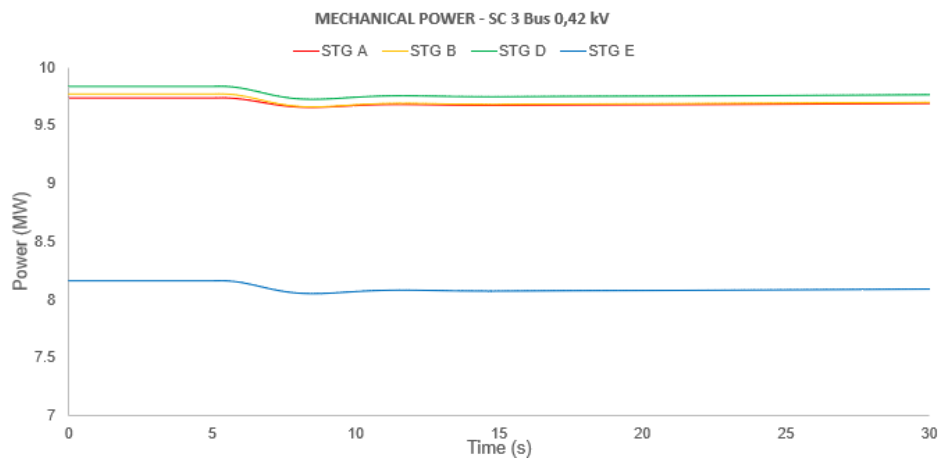
Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100,11	100,11	100,11
Short Circuit	89,41	100,36	93,75
Open CB	99,96	100,16	99,99

Ketika terjadinya hubung singkat pada bus Bus 3-1 pada detik ke-5, dapat dilihat respon tegangan pada salah satu main double busbar pada sisi pembangkit mengalami penurunan yang cukup signifikan, dan steady pada angka 78,79%. Berdasarkan standar IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*, kondisi ini masih bisa dikatakan aman karna respon yang dihasilkan berada diatas standard yang seharusnya yakni diatas 90%.

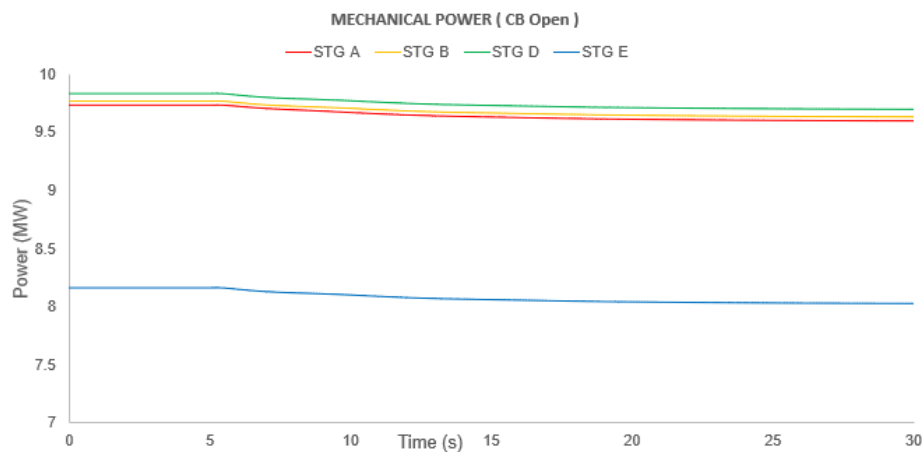
Setelah dilakukannya pembukaan cb yang berada pada dekat arah gangguan, maka dapat dilihat respon tegangan pada *main double busbar* pada sisi pembangkit tidak mengalami penurunan yang cukup signifikan dan dapat kembali kedalam kondisi normal dalam waktu yang singkat. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.75 Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.76 Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.77 Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

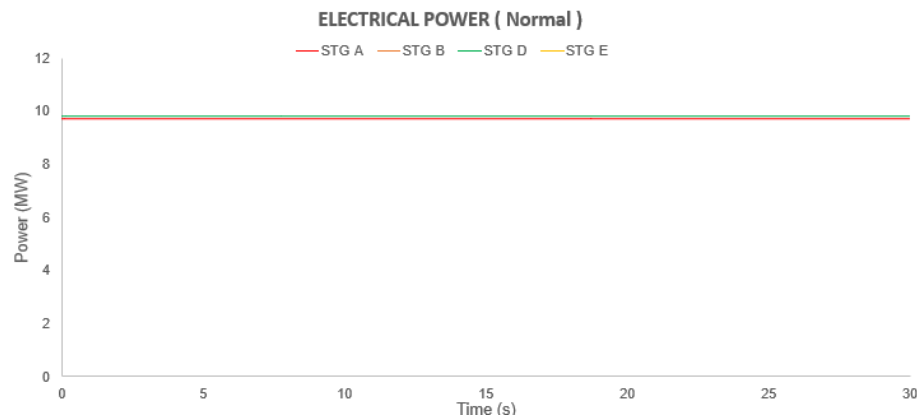
Tabel 4.39 Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Short Circuit	Steady State (MW)	9,68	9,69	OFF	9,76	8,09
Open CB	Steady State (MW)	9,59	9,63	OFF	9,69	8,02

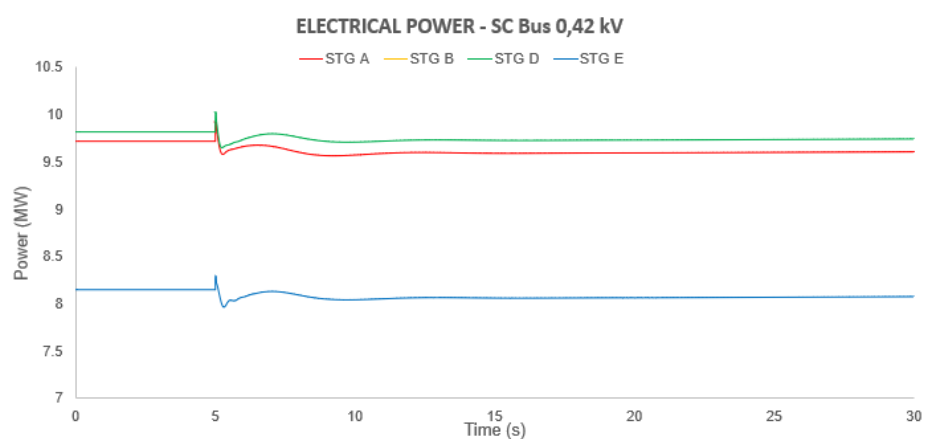
Ketika terjadinya gangguan pada Bus 3-1 di detik ke-5, tidak terjadinya perbedaan yang signifikan ketika sebelum dan sesudah dilakukannya pembukaan cb sebagai salah satu mitigasi ketika terjadinya gangguan hubung singkat. Dapat dianalisa bahwa respon daya mekanik pada

masing-masing pembangkit cenderung stabil meskipun mengalami penurunan yang sangat kecil.

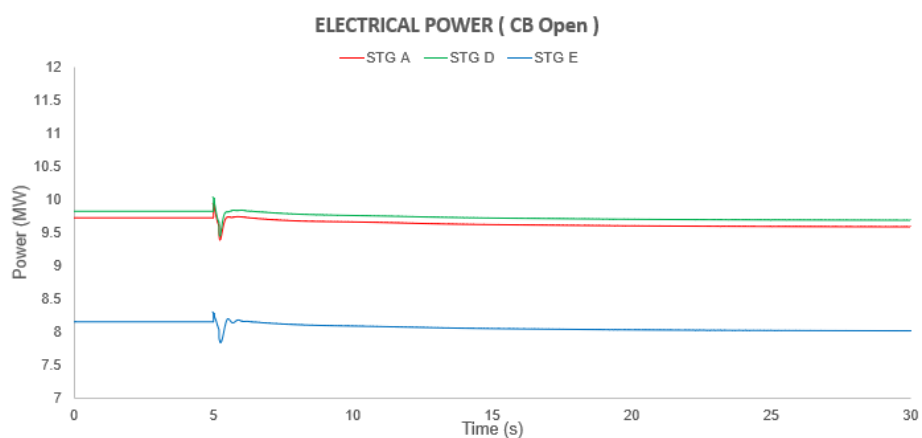
Dengan demikian, sistem dinyatakan aman dan mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.78 Respon Daya elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.79 Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



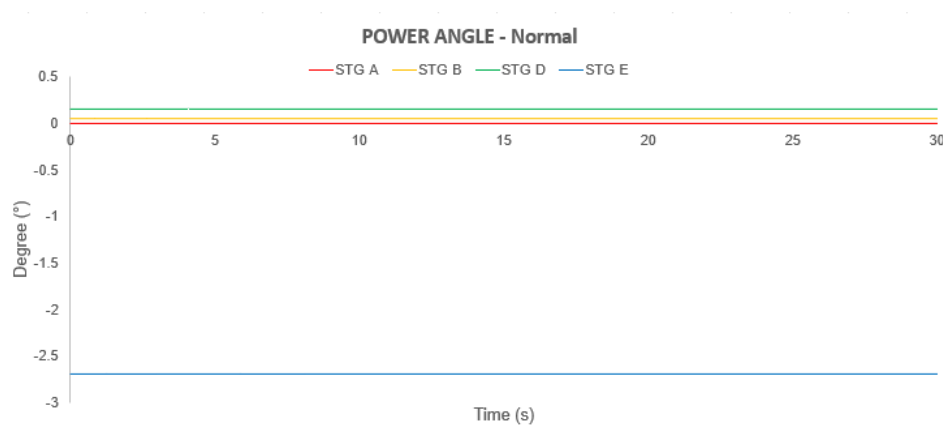
Gambar 4.80 Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.40 Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

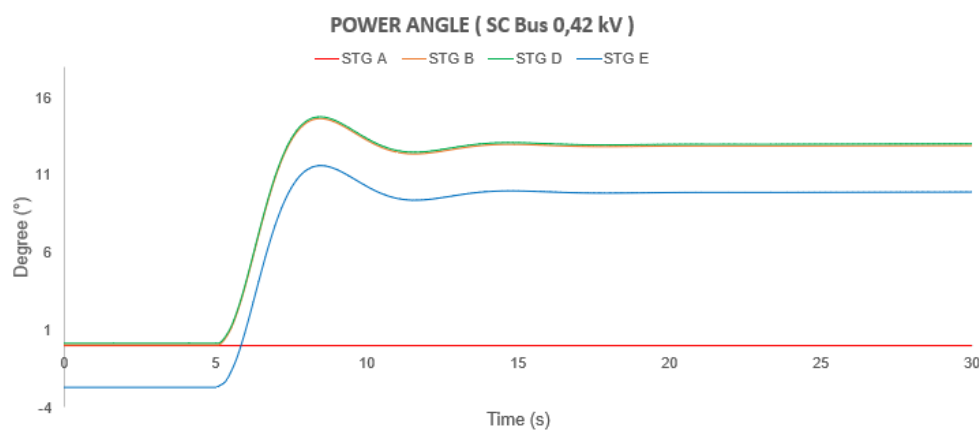
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	9,71	9,75	OFF	9,81	8,15
Short Circuit	Steady State (MW)	9,6	9,67	OFF	9,74	8,07
Open CB	Steady State (MW)	9,58	9,61	OFF	9,68	8,01

Ketika terjadinya gangguan pada Bus 3-1 di detik ke-5, tidak terjadinya perbedaan yang signifikan ketika sebelum dan sesudah dilakukannya pembukaan cb sebagai salah satu mitigasi ketika terjadinya gangguan hubung singkat. Dapat dianalisa bahwa respon daya elektrik pada masing-masing pembangkit cenderung stabil meskipun mengalami penurunan yang sangat kecil.

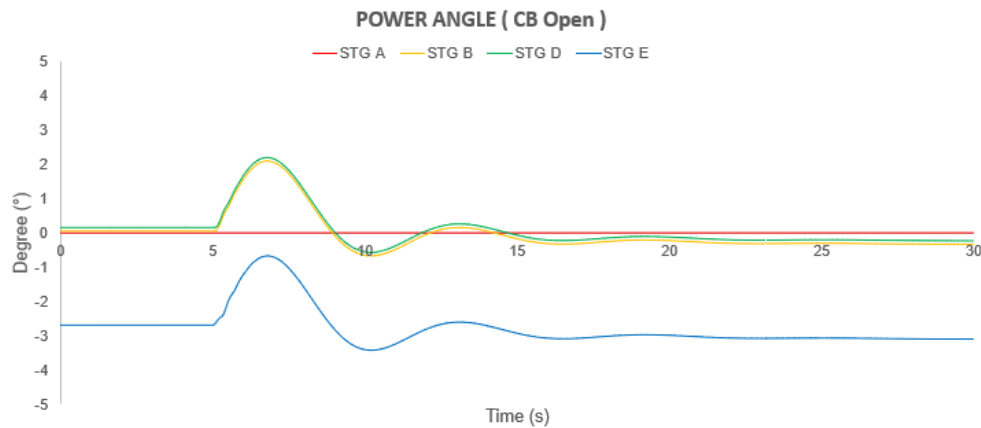
Dengan demikian, sistem dinyatakan aman dan mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.81 Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.82 Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.83 Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

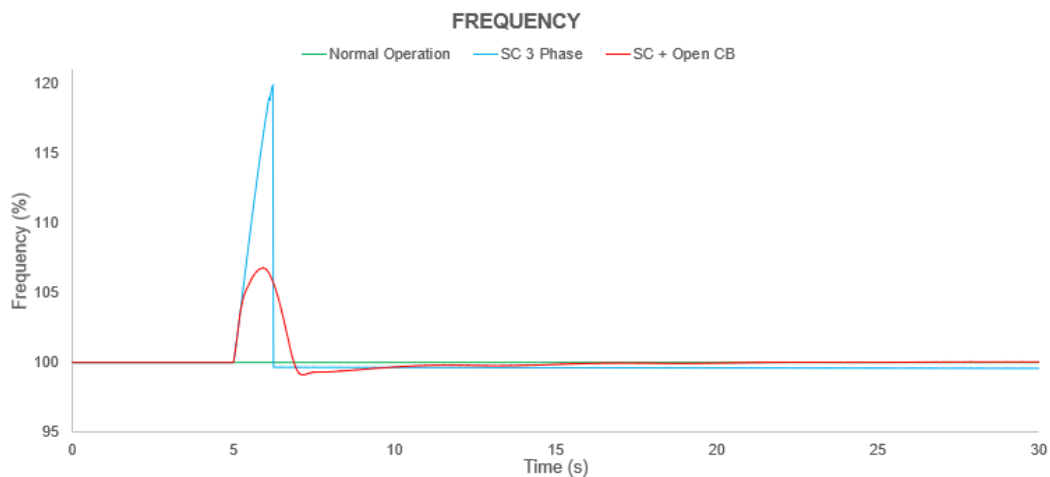
Tabel 4.41 Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	0,05	OFF	0,15	-2,69
Short Circuit	Steady State (MW)	0	12,9	OFF	13,02	9,91
Open CB	Steady State (MW)	0	-0,33	OFF	-0,23	-3,1

Respon sudut tegangan STG A yang bernilai 0° disebabkan karena STG A menjadi sudut referensi perhitungan relative untuk generator lainnya. Dalam sistem kelistrikan, sudut rotor biasanya diukur relatif terhadap referensi tertentu. Oleh sebab itu beberapa generator mengalami perubahan sudut rotor.

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase, dapat dilihat sudut rotor masing-masing generator mengalami kenaikan yang cukup signifikan. Lalu selanjutnya ketika dilakukan pembukaan cb pada detik ke-5,2, maka dapat dilihat respon sudut rotor masing-masing generator dapat kembali turun dan stabil kembali dalam keadaan normal operasi. Dengan adanya mitigasi pembukaan cb yang cepat ini dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.

4.4.2.5 Pola operasi 3 Generator: Hubung singkat 3 Phase Bus 12-PTR-501A Primary Bus (20 kV)



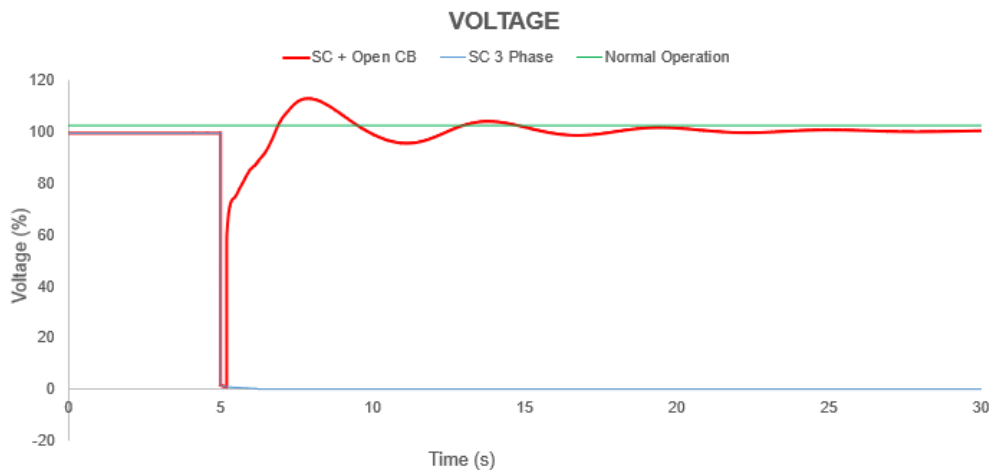
Gambar 4.84 Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV

Tabel 4.42 Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Short Circuit	99,57	119,84	99,57
Open CB	99,11	106,77	100,04

Setelah dilakukannya simulasi pada pola operasi 3 Generator aktif dengan kasus hubung singkat disalah satu perwakilan busbar level tegangan 20 kV, respon frekuensi pada main double busbar menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan. Jika mengacu pada standard IEEE Std. C37.106-2003: *Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*, kondisi ini berada pada zona *prohibited operation* yang merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga frekuensi tidak diizinkan mencapai daerah tersebut. Kenaikan frekuensi secara tiba-tiba dan sesaat ini diakibatkan karena seolah-olah daya mekaniknya mengalami kenaikan sehingga governor mengalami percepatan sehingga frekuensi semakin tinggi.

Ketika dilakukannya pembukaan CB pada detik ke-5,2, maka dapat dilihat respon frekuensi yang dihasilkan tidak mengalami kenaikan yang cukup tinggi dibandingkan sebelum dilakukannya pembukaan CB yang berada didekat gangguan dan kembali dapat beroperasi ke dalam kondisi normal sehingga dapat dikatakan respon frekuensi yang dihasilkan setelah dilakukannya pembukaan CB yang berada didekat gangguan dapat berhasil mengamankan sistem kelistrikan. Hal ini disebabkan sistem memiliki inersia yang cukup.



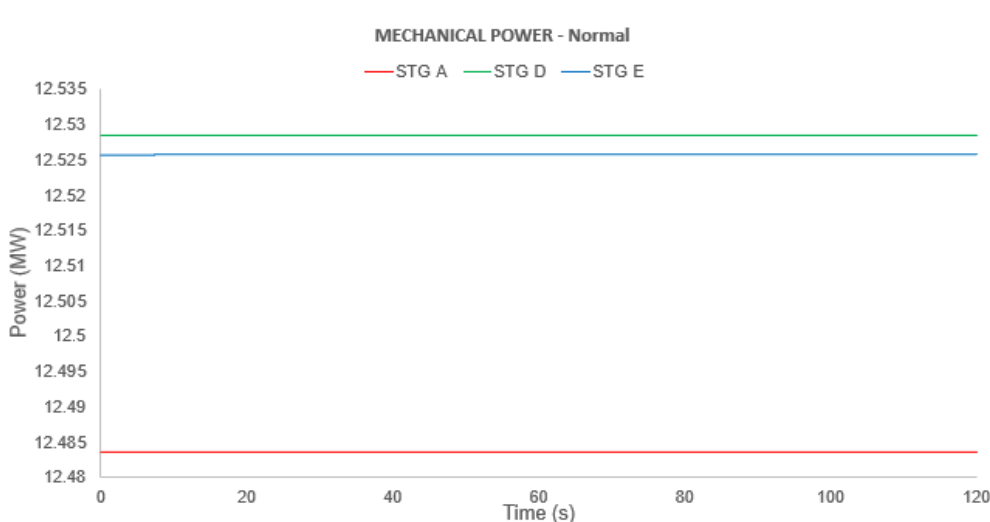
Gambar 4.85 Respon Tegangan ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV

Tabel 4.43 Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV

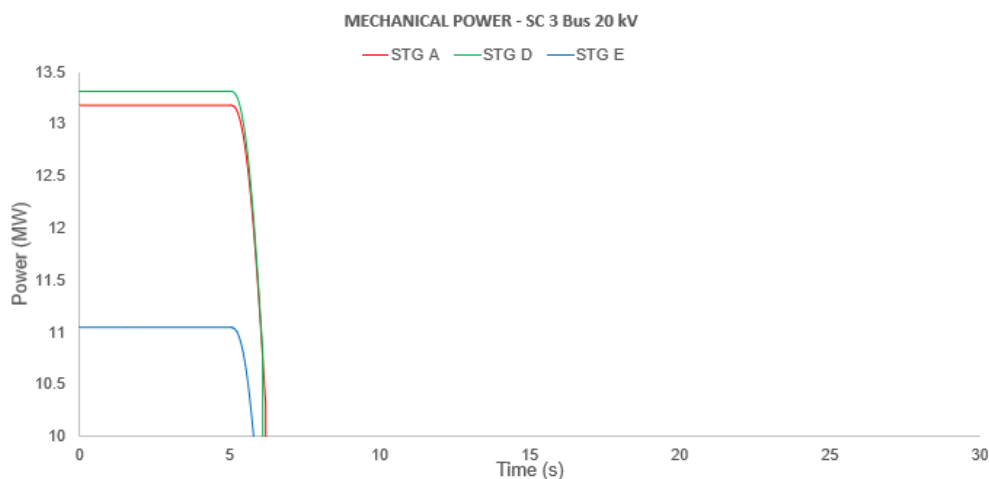
Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	102,54	102,54	102,54
Short Circuit	0	99,55	0
Open CB	0,92	112,98	100,45

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada pola operasi 3 Generator aktif di salah satu perwakilan level tegangan 20 kV, respon nilai tegangan yang dihasilkan pada salah satu *main double busbar* menunjukkan penurunan hingga 0%, hal ini dapat menyebabkan arus gangguan yang lewat sangat besar sehingga dapat membahayakan sistem beroperasi.

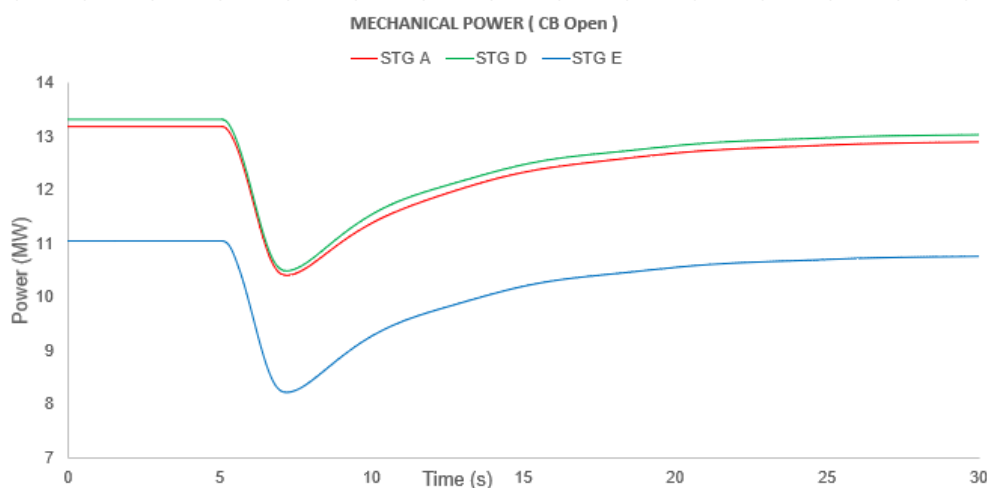
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada detik ke-5,2, maka respon tegangan pada salah satu *main double busbar* mengalami kenaikan dalam waktu yang singkat dan dapat kembali beroperasi secara normal sesuai dengan standard IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*.



Gambar 4.86 Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV



Gambar 4.87 Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV



Gambar 4.88 Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

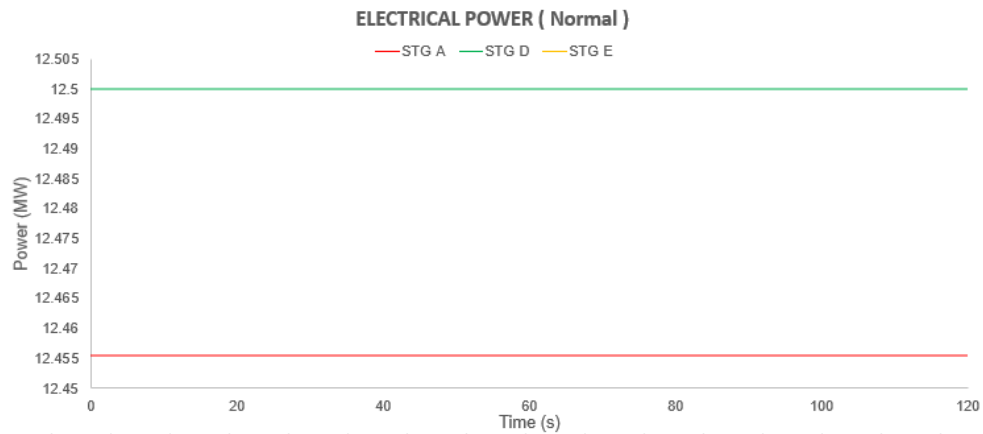
Tabel 4.44 Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV

Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,48	OFF	OFF	12,52	12,52
Short Circuit	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	12,89	OFF	OFF	13,02	10,76

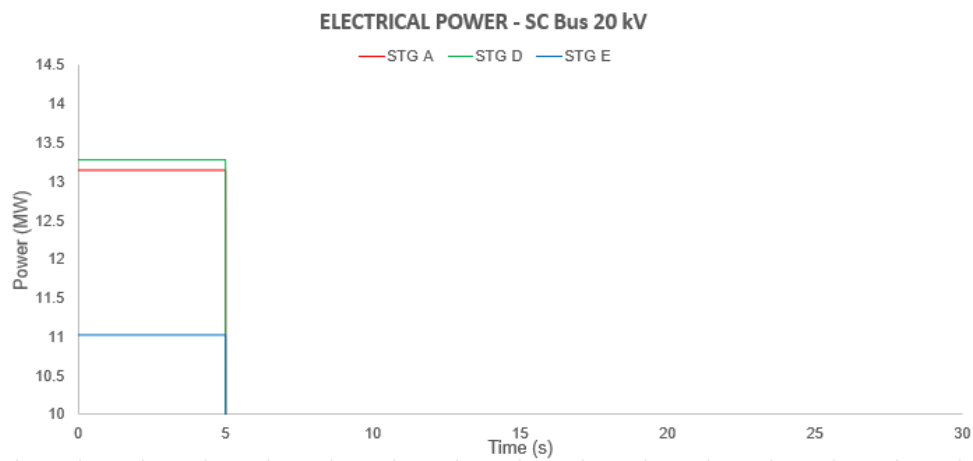
Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 3 Generator aktif pada detik ke-5, respon daya mekanik pada masing-masing generator mengalami penurunan hingga mencapai 0%. Hal ini menyebabkan daya mekanik pada generator tidak bekerja sehingga seluruh generator yang beroperasi tidak mengeluarkan daya supply dan sistem mengalami *black out*, sehingga diperlukan pembukaan cb didekat gangguan yang sangat cepat agar sistem tidak mengalami *black out* dan gagal beroperasi.

Ketika dilakukannya pembukaan CB pada salah satu gangguan hubung singkat, dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit menunjukkan penurunan sesaat

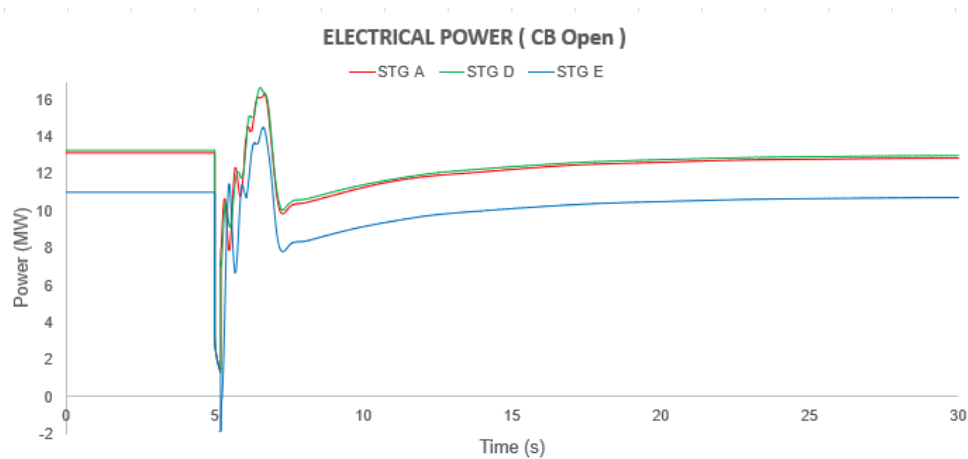
dan kembali mempertahankan kestabilannya pada detik ke-10, hal ini dapat dikatakan sistem aman dan dapat mempertahankan kondisi kestabilannya



Gambar 4.89 Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV



Gambar 4.90 Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV



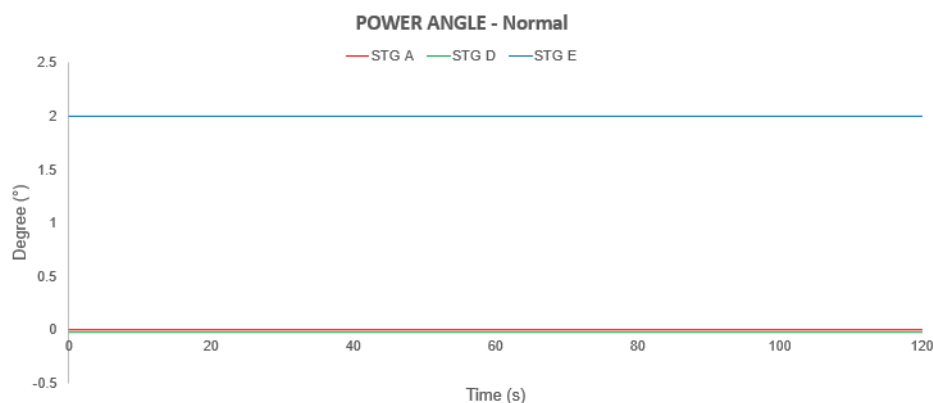
Gambar 4.91 Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.45 Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV

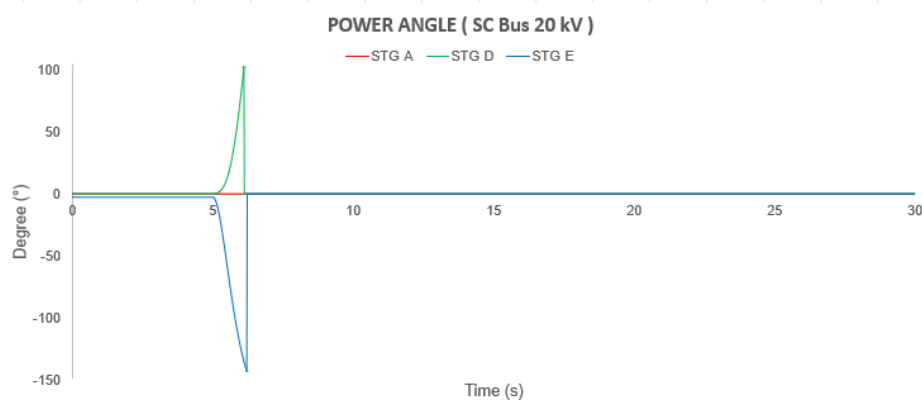
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,45	OFF	OFF	12,5	12,5
Short Circuit	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	12,86	OFF	OFF	12,99	10,74

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 3 Generator aktif pada detik ke-5, respon daya elektrik pada masing-masing generator mengalami penurunan hingga mencapai 0%. Hal ini menyebabkan daya elektrik pada generator tidak bekerja sehingga seluruh generator yang beroperasi tidak mengeluarkan daya supply dan sistem mengalami *black out*, sehingga diperlukan pembukaan cb didekat gangguan yang sangat cepat agar sistem tidak mengalami *black out* dan gagal beroperasi.

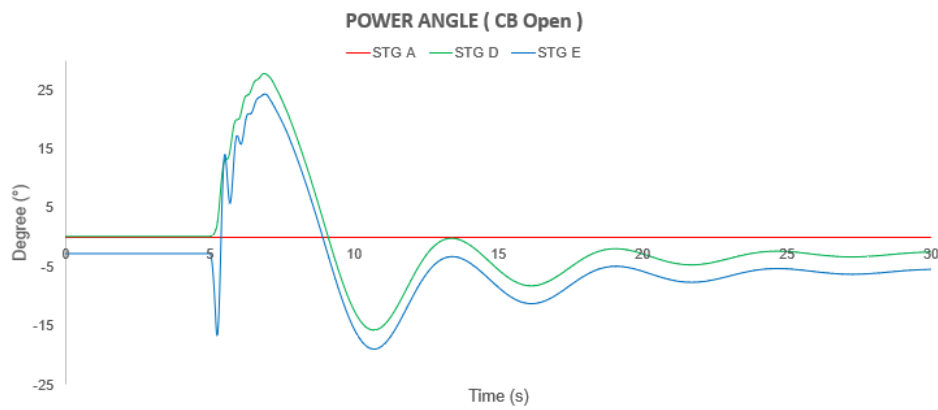
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada salah satu gangguan hubung singkat, dapat dilihat respon daya elektrik pada masing-masing pembangkit menunjukkan penurunan sesaat dan kembali mempertahankan kestabilannya pada detik ke-10, hal ini dapat dikatakan sistem aman dan dapat mempertahankan kondisi kestabilannya.



Gambar 4.92 Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV



Gambar 4.93 Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV



Gambar 4.94 Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

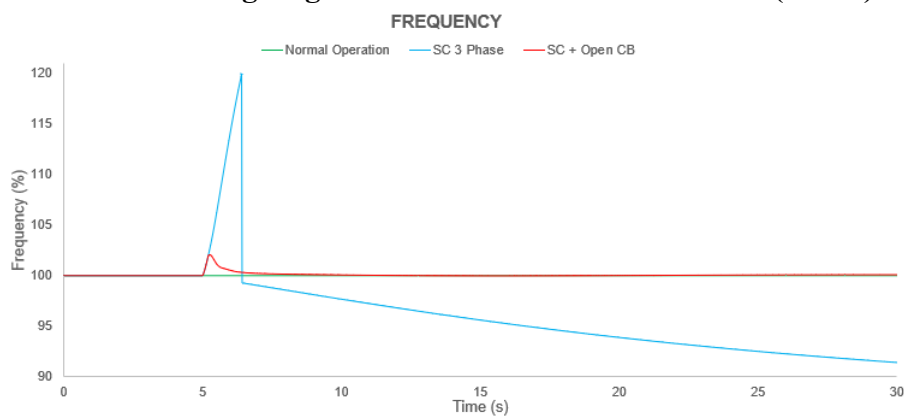
Tabel 4.46 Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 20 kV

Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	-0,023	1,99
Short Circuit	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	-2,49	-5,42

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 4 Generator aktif pada detik ke-5, respon sudut rotor pada masing-masing pembangkit mengalami penurunan hingga mencapai 0° sehingga seluruh pembangkit mengalami kehilangan sinkronisasinya sehingga generator tidak lagi berputar pada kecepatan dan fase yang sama dengan sistem sehingga dapat menyebabkan kerusakan serius pada pembangkit.

Ketika dilakukannya pembukaan cb di dekat gangguan, maka respon sudut rotor yang dihasilkan oleh masing-masing pembangkit mengalami kenaikan sesaat dan kembali dalam kondisi normalnya. Dapat dikatakan kondisi ini sudah aman karena sistem dapat mempertahankan kestabilannya dan aman ketika beroperasi.

4.4.2.6 3 Generator: Hubung singkat 3 Phase Bus 51-G-101A BUS (10 kV)



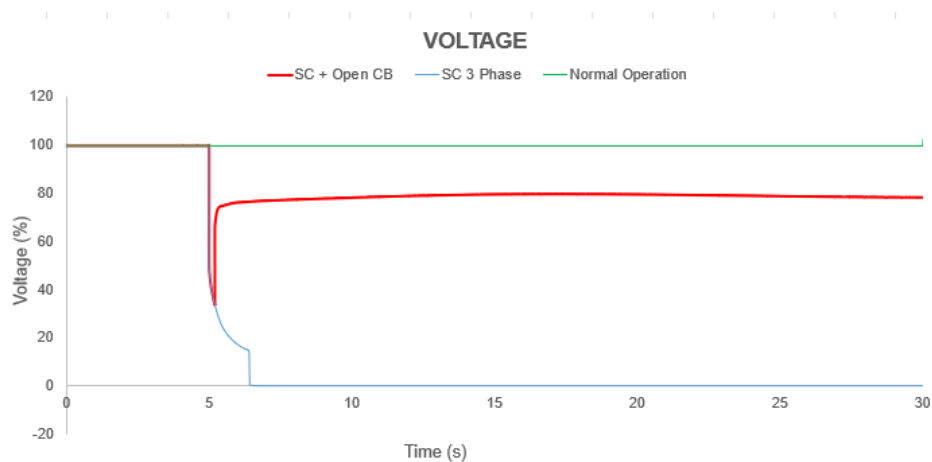
Gambar 4.95 Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

Tabel 4.47 Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	100	100	100
Short Circuit	91,4	119,92	91,4
Open CB	99,98	102,06	100,09

Setelah dilakukannya simulasi pada pola operasi 3 Generator aktif dengan kasus hubung singkat disalah satu perwakilan busbar level tegangan 10 kV, respon frekuensi pada *main double busbar* menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan. Jika mengacu pada standard IEEE Std. C37.106-2003: *Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*, kondisi ini berada pada zona *prohibited operation* yang merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga frekuensi tidak dizinkan mencapai daerah tersebut. Kenaikan frekuensi secara tiba-tiba dan sesaat ini diakibatkan karena seolah-olah daya mekaniknya mengalami kenaikan sehingga governor mengalami percepatan sehingga frekuensi semakin tinggi. Lalu pada detik ke-7, frekuensi mengalami penurunan hingga mencapai 91,4% dan tidak dapat kembali stabil sehingga hal ini tidak disarankan untuk terjadi karena melihat respon grafik yang semakin menurun akan mengakibatkan kegagalan sistem dalam beroperasi.

Ketika dilakukannya pembukaan CB pada detik ke-5,2, maka dapat dilihat respon frekuensi yang dihasilkan tidak mengalami kenaikan yang cukup tinggi dibandingkan sebelum dilakukannya pembukaan CB yang berada didekat gangguan dan kembali dapat beroperasi ke dalam kondisi normal sehingga dapat dikatakan respon frekuensi yang dihasilkan setelah dilakukannya pembukaan CB yang berada didekat gangguan dapat berhasil mengamankan sistem kelistrikan.

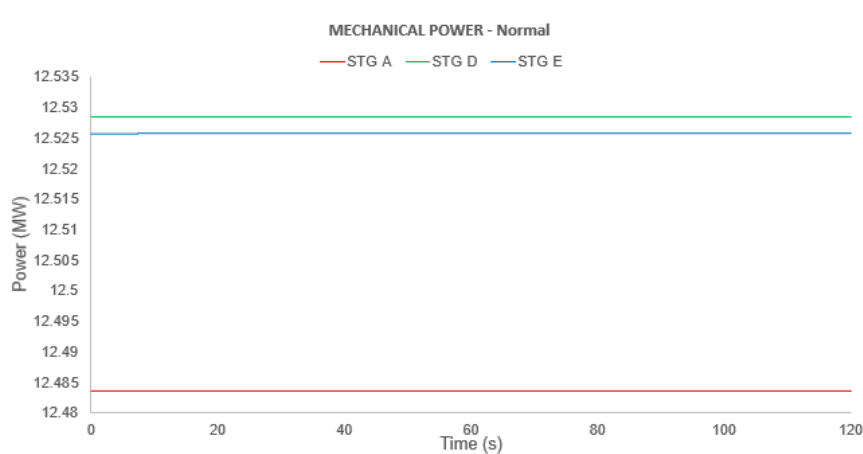
**Gambar 4.96** Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

Tabel 4.48 Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

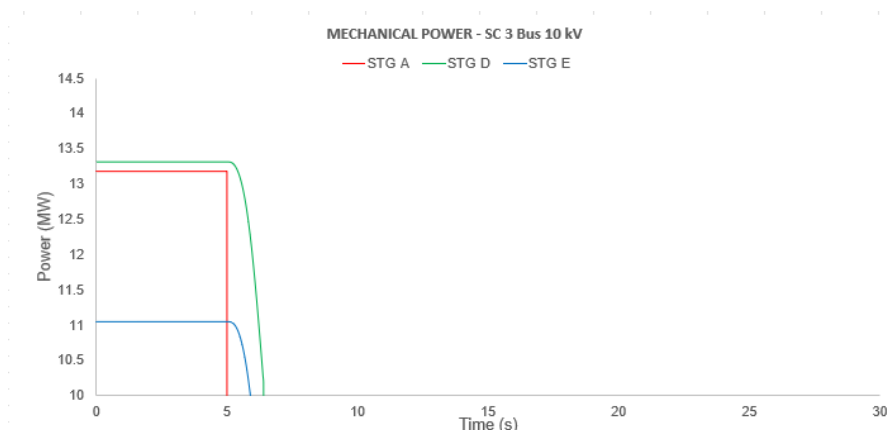
Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	99,6	99,6	99,6
Short Circuit	0	99,6	0
Open CB	33,6	99,6	78,12

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada pola operasi 3 Generator aktif di salah satu perwakilan level tegangan 10 kV, respon nilai tegangan yang dihasilkan pada salah satu *main double busbar* menunjukkan penurunan hingga 0%, hal ini dapat menyebabkan arus gangguan yang lewat sangat besar sehingga dapat membahayakan sistem beroperasi dan mengalami kegagalan.

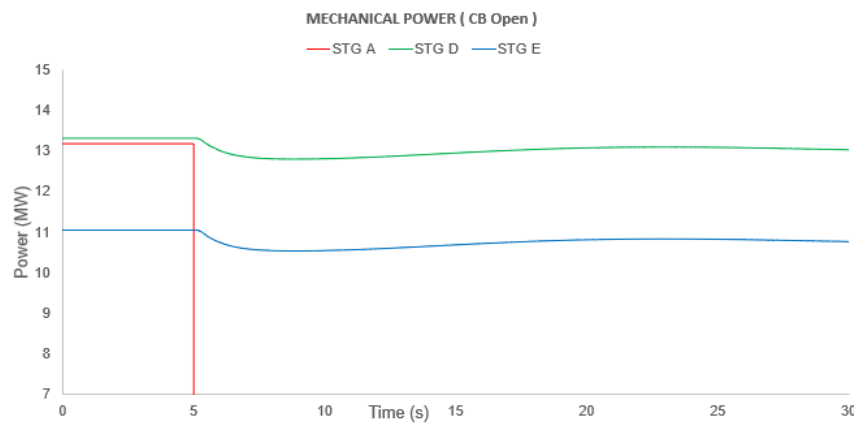
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada detik ke-5,2, maka respon tegangan pada salah satu *main double busbar* mengalami penurunan sesaat dan kembali naik dan steady pada kondisi 78,12% dan tidak dapat kembali beroperasi secara normal sesuai dengan standard *IEEE Std 1159-2019 Voltage Magnitude Event*. Hal ini disebabkan karena sistem mengalami kekurangan daya yang disupply oleh salah satu pembangkit, karena dalam kondisi ini dapat dikatakan terjadinya tripping generator STG A akibat adanya gangguan hubung singkat sehingga tentunya diperlukan mitigasi *load shedding* pada kasus ini. Untuk contoh mitigasi ketika satu STG trip, sudah dijelaskan pada halaman sebelumnya.



Gambar 4.97 Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV



Gambar 4.98 Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV



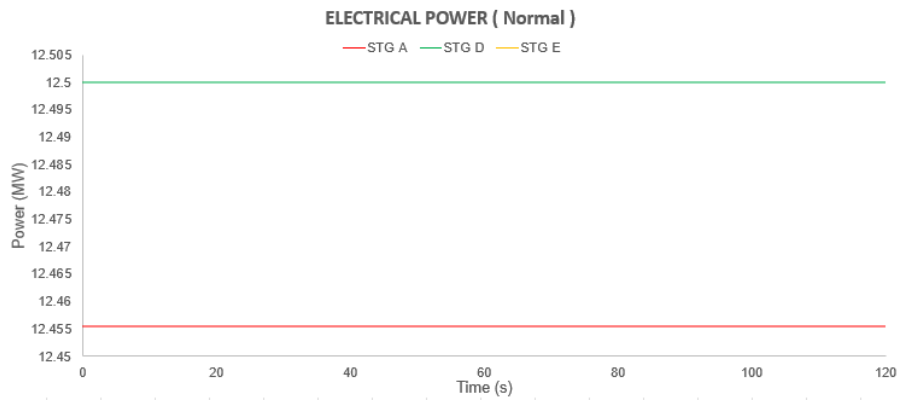
Gambar 4.99 Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.49 Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

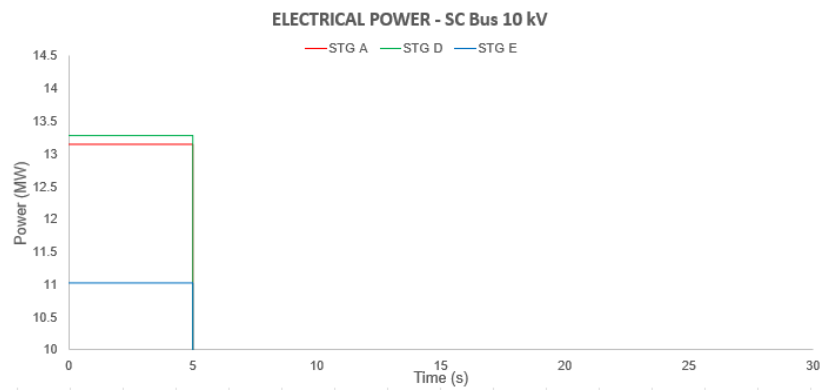
Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,48	OFF	OFF	12,52	12,52
Short Circuit	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	13,03	10,76

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 3 Generator aktif pada detik ke-5, respon daya mekanik pada masing-masing generator mengalami penurunan hingga mencapai 0%. Hal ini menyebabkan daya mekanik pada generator tidak bekerja sehingga seluruh generator yang beroperasi tidak mengeluarkan daya supply dan sistem mengalami blackout, sehingga diperlukan pembukaan cb didekat gangguan yang sangat cepat agar sistem tidak mengalami black out dan gagal beroperasi.

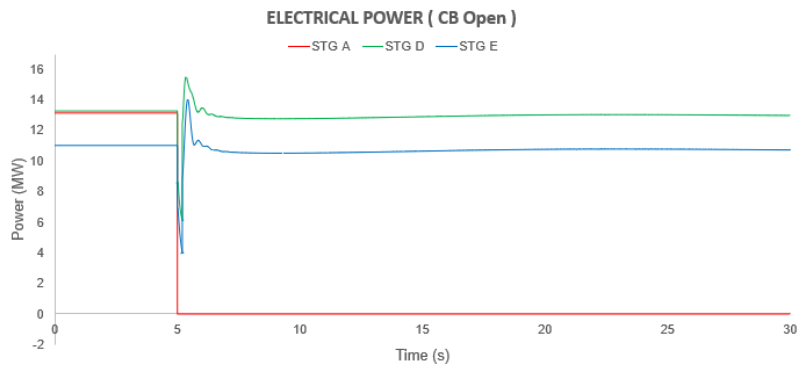
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada salah satu gangguan hubung singkat, dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit menunjukkan penurunan sesaat dan kembali mempertahankan kestabilannya pada detik ke-10, hal ini dapat dikatakan sistem aman dan dapat mempertahankan kondisi kestabilannya hanya saja perlu diperhatikan daya yang hilang masih belum bisa dibackup oleh generator lainnya sehingga diperlukannya skema *load shedding* agar sistem tetap dapat berada dalam kondisi normalnya. Untuk contoh mitigasi ketika satu STG trip, sudah dijelaskan pada halaman sebelumnya.



Gambar 4.100 Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV



Gambar 4.101 Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV



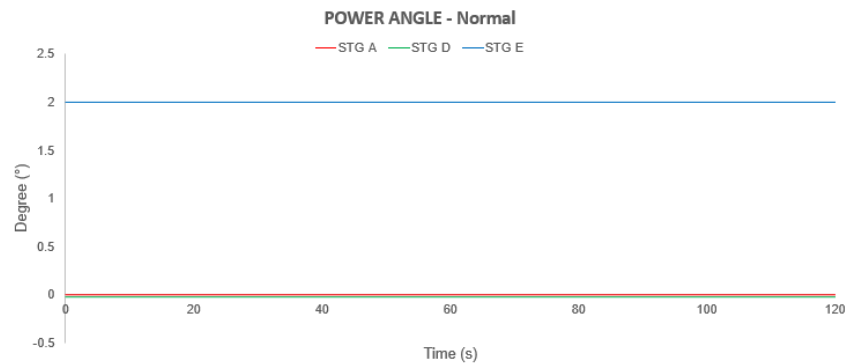
Gambar 4.102 Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigas Open CB

Tabel 4.50 Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

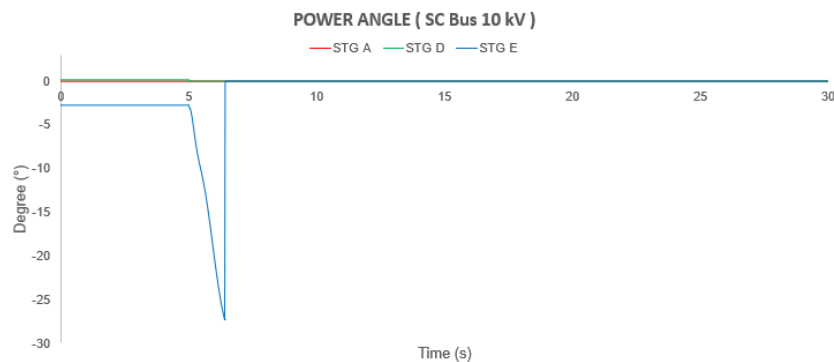
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,45	OFF	OFF	12,5	12,5
Short Circuit	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	12,98	10,73

Selanjutnya dapat dilihat untuk kasus hubung singkat 3 phase pada pola operasi 3 Generator aktif pada detik ke-5, respon daya elektrik pada masing-masing generator mengalami penurunan hingga mencapai 0%. Hal ini menyebabkan daya elektrik pada generator tidak bekerja sehingga seluruh generator yang beroperasi tidak mengeluarkan daya supply dan sistem mengalami blackout, sehingga diperlukan pembukaan cb didekat gangguan yang sangat cepat agar sistem tidak mengalami black out dan gagal beroperasi.

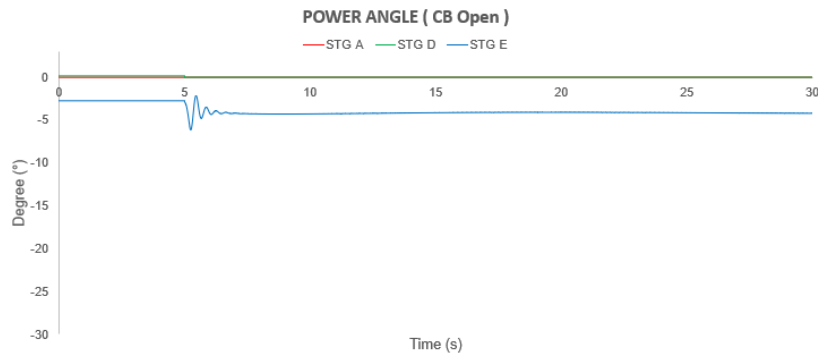
Ketika dilakukannya pembukaan CB pada salah satu gangguan hubung singkat, dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit menunjukkan penurunan sesaat dan kembali mempertahankan kestabilannya pada detik ke-10, hal ini dapat dikatakan sistem aman dan dapat mempertahankan kondisi kestabilannya hanya saja perlu diperhatikan daya yang hilang masih belum bisa dibackup oleh generator lainnya sehingga diperlukannya skema *load shedding* agar sistem tetap dapat berada dalam kondisi normalnya. Untuk contoh mitigasi ketika satu STG trip, sudah dijelaskan pada halaman sebelumnya.



Gambar 4.103 Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV



Gambar 4.104 Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV



Gambar 4.105 Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.51 Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 10 kV

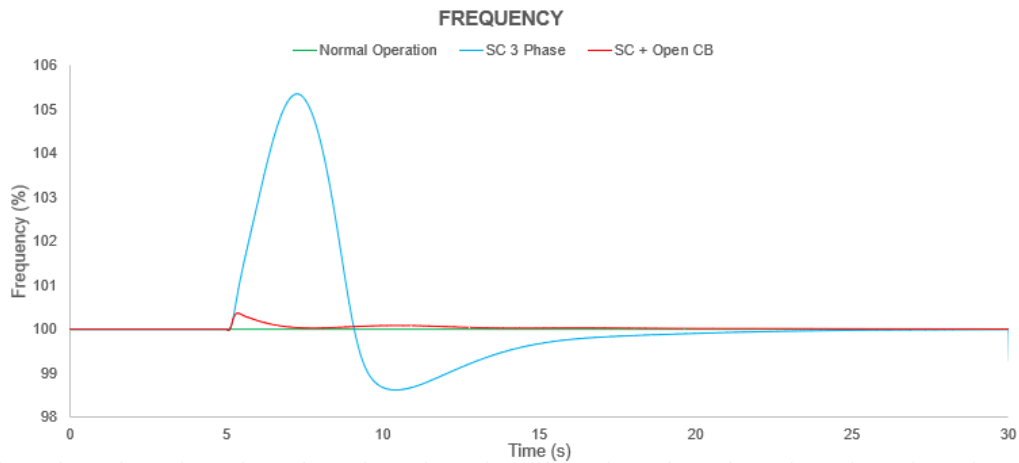
Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	-0,023	1,99
Short Circuit	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	0	0
Open CB	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	0	-4,21

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat pada 51-G-101A BUS di detik ke-5 dengan pola operasi 3 generator aktif, maka dapat dianalisis beberapa hal, respon sudut tegangan STG A yang bernilai 0° disebabkan karena STG A menjadi sudut referensi perhitungan relative untuk generator lainnya. Dalam sistem kelistrikan, sudut rotor biasanya diukur relatif terhadap referensi tertentu. Sedangkan sudut rotor pembangkit lainnya mengalami kegagalan dan kehilangan sinkronisasinya dengan sistem. Hal ini tentu tidak diperbolehkan karena akan berdampak buruk bagi sistem dan generator lainnya tidak dapat membackup daya yang hilang akibat adanya gangguan pada STG A.

Ketika dilakukannya pembukaan CB, dapat dilihat referensi 0 derajat diubah dari STG A ke generator STG B, maka sudut rotor generator lain yang beroperasi dalam sistem tersebut juga akan berubah. Oleh sebab itu beberapa generator mengalami perubahan sudut rotor. Perubahan yang terjadi masih berada dalam batas yang di izinkan dimana STG E mengalami osilasi sesaat dan dapat kembali stabil dan mempertahankan sinkronisasinya.

4.4.2.7 Pola operasi 3 Generator: Hubung singkat 3 Phase Bus 01-PMC2-02B (3,15 kV)

Pada skenario dengan pola operasi PLN aktif dan 3 generator beroperasi, dengan studi kasus bus 3,15 kV mengalami hubung singkat. Analisis kestabilan ini dilakukan pada detik ke 5, dengan total durasi simulasi 30 detik. Parameter yang akan diamati adalah frekuensi sistem, daya mekanis dan listrik pada STG, sudut rotor, daya trafo PLN dan tegangan sistem yang masing-masing akan ditunjukkan Berikut ini merupakan respons dari sistem yang dihasilkan



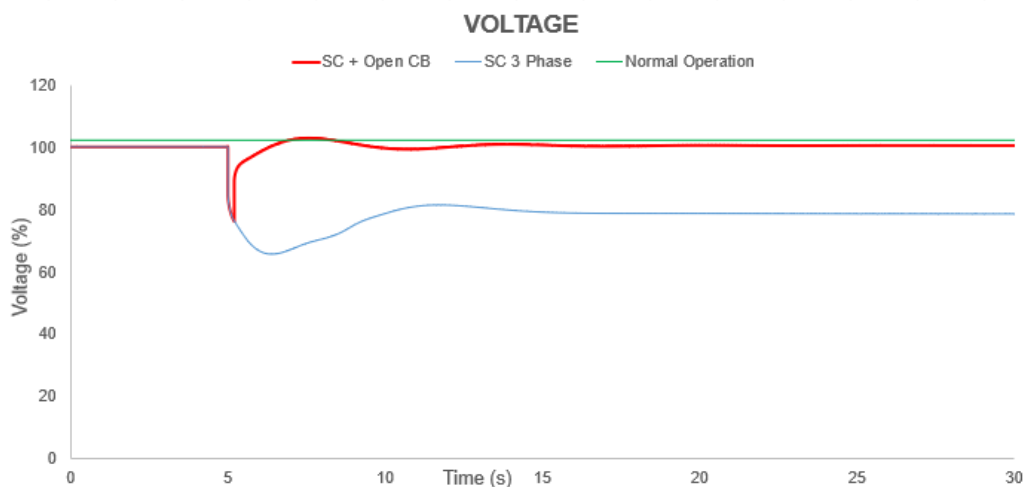
Gambar 4.106 Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

Tabel 4.52 Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	98,9	100	99,99
Short Circuit	98,61	105,35	99,97
Open CB	99,97	100,37	100,01

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase di bus 01-PMC2-02B pada detik ke 5, respon frekuensi yang dihasilkan pada main double busbar pada sisi pembangkit dapat dilihat pada gambar 4.169, mengalami kenaikan yang cukup signifikan dan dapat kembali kedalam kondisi normal pada detik ke 20.

Sedangkan, setelah dilakukan mitigasi dengan melakukan *command open cb* pada CB terdekat dengan titik gangguan selama 0,2 s setelah gangguan, maka respon frekuensi yang dihasilkan dapat dilihat bahwasanya frekuensi tidak mengalami kenaikan yang signifikan dan dapat kembali stabil pada detik ke-6.



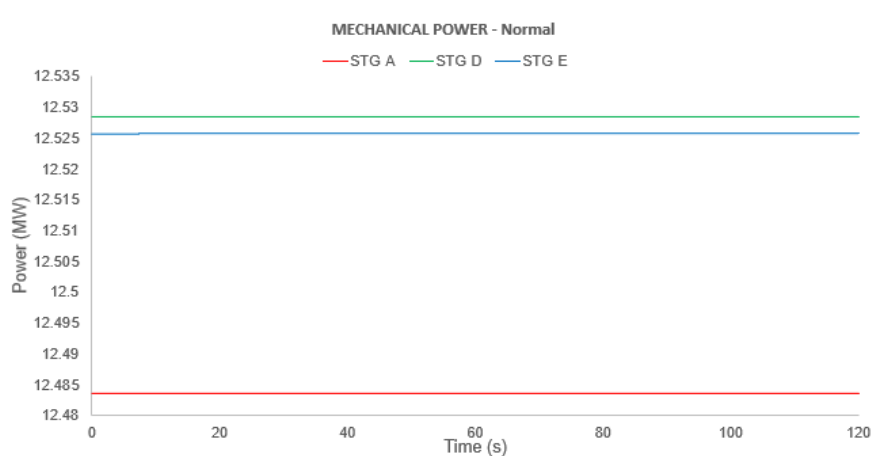
Gambar 4.107 Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

Tabel 4.53 Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

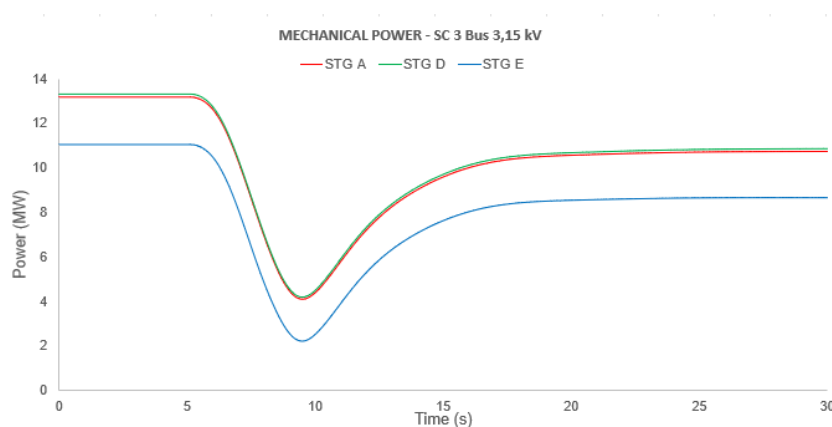
Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	99,6	99,6	99,6
Short Circuit	65,82	100,36	78,79
Open CB	76,48	103,18	100,8

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase di bus 01-PMC2-02B pada detik ke 5, respon frekuensi yang dihasilkan pada main double busbar pada sisi pembangkit dapat dilihat pada gambar 4.170 , mengalami penurunan yang cukup besar hingga mencapai 65% dan tidak dapat kembali ke dalam kondisi normal operasinya, dan apabila mengacu pada standard IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*, kondisi ini masih belum bisa dikatakan aman karna respon yang dihasilkan berada dibawah standard yang seharusnya yakni dibawah 90%.

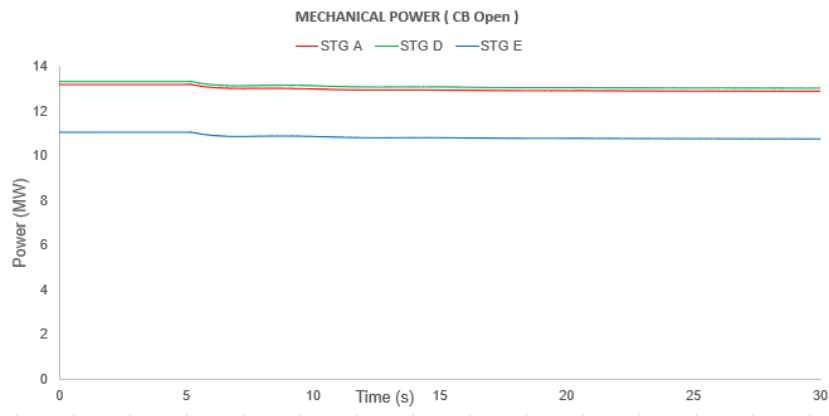
Namun, setelah pembukaan CB pada detik ke-5.2, sistem cenderung kembali normal dan mampu mengembalikan keseimbangan setelah gangguan tersebut. Dengan demikian sistem dinyatakan aman dan memenuhi standar operasi kontinu berdasarkan standard IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*



Gambar 4.108 Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.109 Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



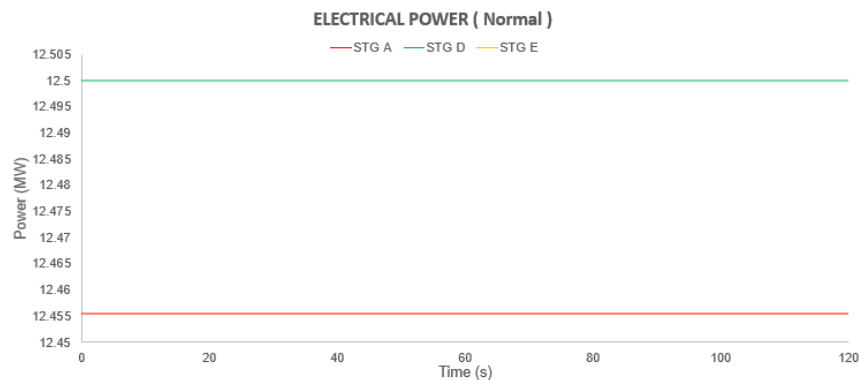
Gambar 4.110 Respon Daya Mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.54 Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

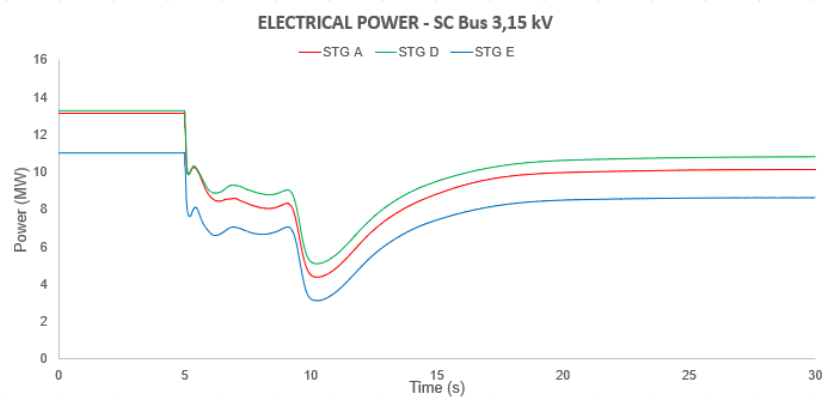
Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,48	OFF	OFF	12,52	12,52
Short Circuit	Steady State (MW)	10,73	OFF	OFF	10,86	8,65
Open CB	Steady State (MW)	12,8	OFF	OFF	13,01	10,75

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada bus 3,15 kV, maka respon daya mekanik pada setiap pembangkit yang beroperasi mengalami penurunan, apabila hal ini dibiarkan maka akan berdampak kepada sistem dimana daya yang dibutuhkan oleh sistem tidak terpenuhi sehingga perlu dilakukannya mitigasi pembukaan cb secepat mungkin agar sistem tetap dapat terjaga kestabilannya. Dapat dilihat ketika terjadinya gangguan daya mekanik pada masing masing pembangkit mengalami penurunan dan mulai kembali naik didetik 10, hal ini tentu saja dapat membahayakan sistem.

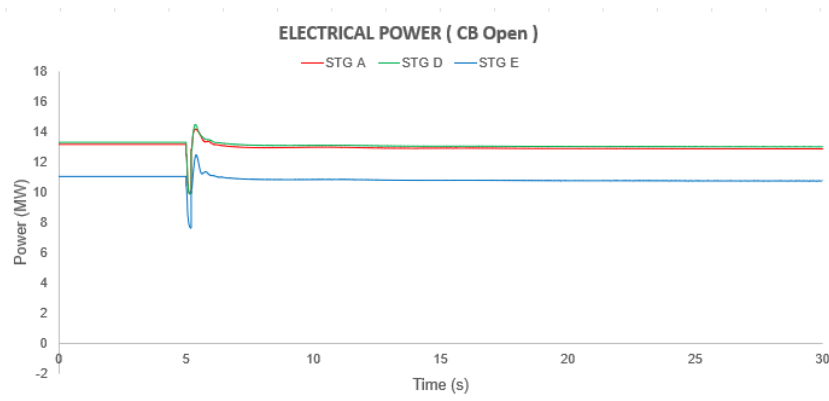
Setelah dilakukannya pembukaan cb di detik 5,2 setelah gangguan, maka dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit dapat kembali ke dalam kondisi normal dengan waktu yang lebih singkat. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.111 Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.112 Respon Daya Elektrik Sesudah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



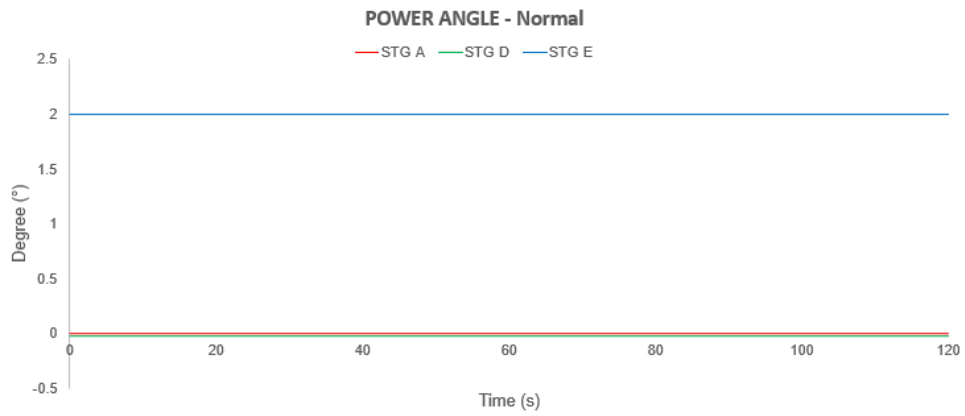
Gambar 4.113 Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.55 Data Respon Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

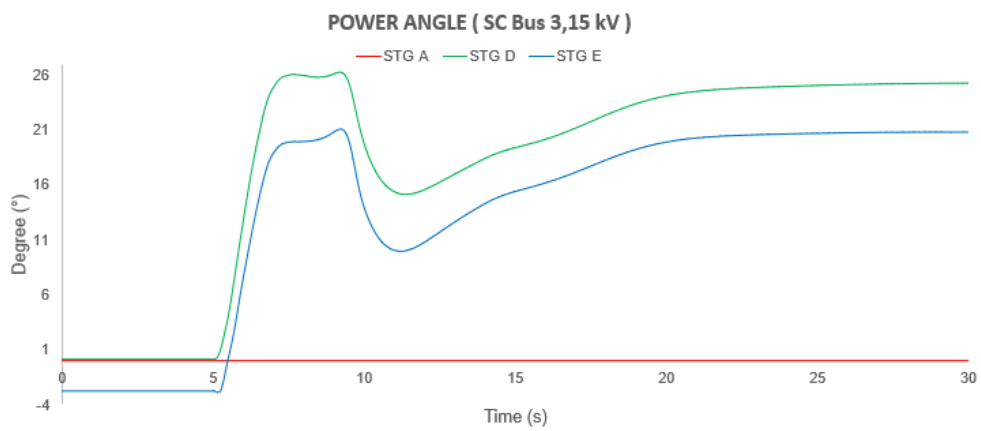
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,45	OFF	OFF	12,5	12,5
Short Circuit	Steady State (MW)	10,13	OFF	OFF	10,81	8,62
Open CB	Steady State (MW)	12,85	OFF	OFF	12,98	10,72

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada bus 3,15 kV, maka respon daya elektrik pada setiap pembangkit yang beroperasi mengalami penurunan, apabila hal ini dibiarkan maka akan berdampak kepada sistem dimana daya yang dibutuhkan oleh sistem tidak terpenuhi sehingga perlu dilakukannya mitigasi pembukaan cb secepat mungkin agar sistem tetap dapat terjaga kestabilannya. Dapat dilihat ketika terjadinya gangguan, daya elektrik pada masing masing pembangkit mengalami penurunan dan mulai kembali naik didetik 10, hal ini tentu saja dapat membahayakan sistem.

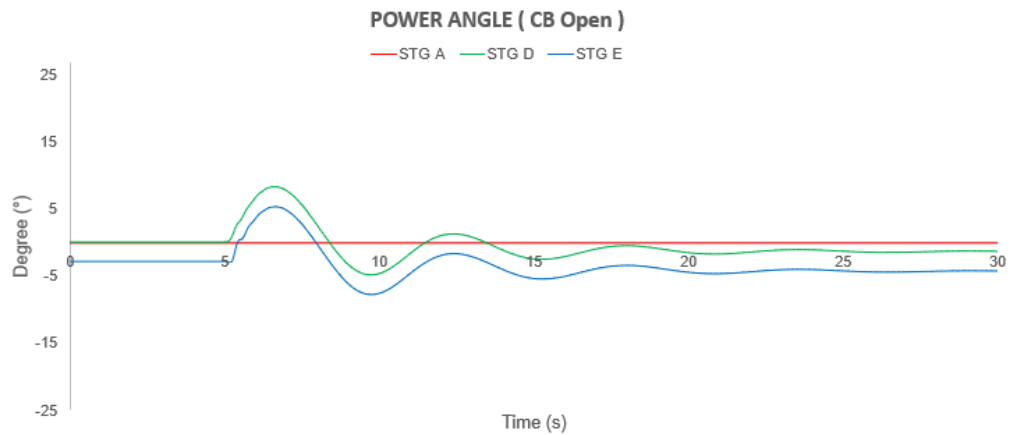
Setelah dilakukannya pembukaan cb di detik 5,2 setelah gangguan, maka dapat dilihat respon daya elektrik pada masing-masing pembangkit dapat kembali ke dalam kondisi normal dengan waktu yang lebih singkat. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4. 114 Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.115 Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV



Gambar 4.116 Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.56 Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 3,15 kV

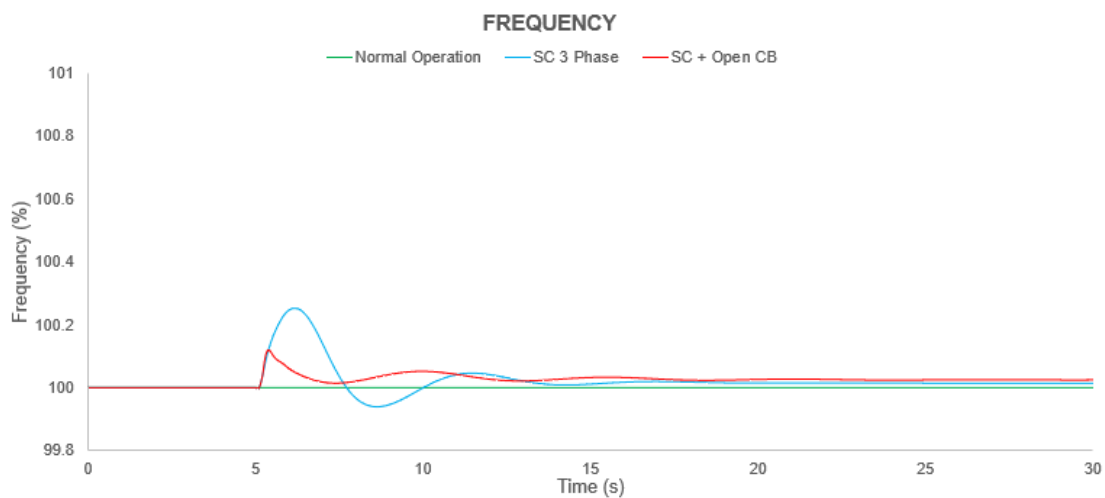
Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	-0,023	1,99
Short Circuit	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	25,28	20,82
Open CB	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	-1,24	-4,18

Respon sudut tegangan STG A yang bernilai 0° disebabkan karena STG A menjadi sudut referensi perhitungan relative untuk generator lainnya. Dalam sistem kelistrikan, sudut rotor biasanya diukur relatif terhadap referensi tertentu. Oleh sebab itu beberapa generator mengalami perubahan sudut rotor.

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase, dapat dilihat sudut rotor masing-masing generator mengalami kenaikan yang cukup signifikan, Lalu selanjutnya ketika dilakukan pembukaan cb pada detik ke-5,2, maka dapat dilihat respon sudut rotor masing-masing generator dapat kembali turun dan stabil kembali dalam keadaan normal operasi. Dengan adanya mitigasi pembukaan cb yang cepat ini dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.

4.4.2.8 Pola operasi PLN dan 3 Generator: Hubung singkat 3 Phasa Bus3-1 (0,42 kV)

Pada skenario dengan pola operasi PLN aktif dan 3 generator beroperasi, dengan studi kasus bus 0,42 kV mengalami hubung singkat. Analisis kestabilan ini dilakukan pada detik ke 5, dengan total durasi simulasi 30 detik. Parameter yang akan diamati adalah frekuensi sistem, daya mekanis dan elektrik pada STG, sudut rotor, daya trafo PLN dan tegangan sistem yang masing-masing akan ditunjukkan Berikut ini merupakan respons dari sistem yang dihasilkan

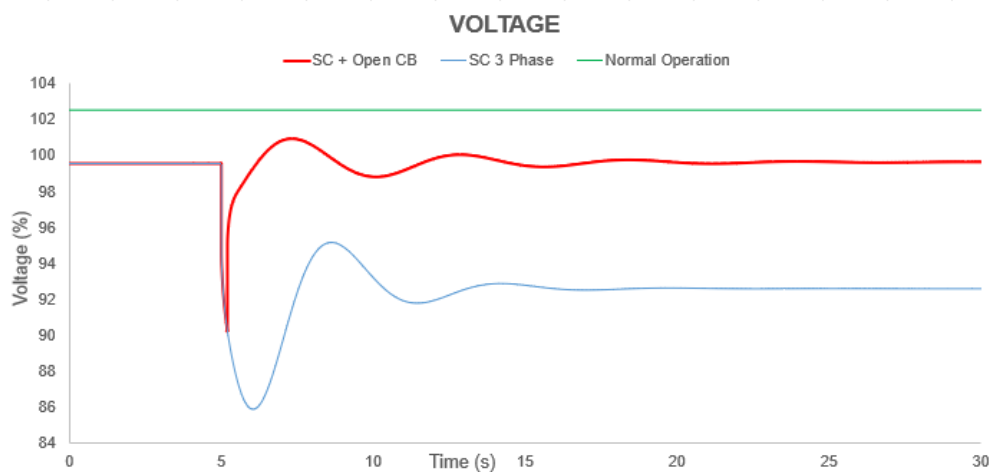
**Gambar 4.117** Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

Tabel 4.57 Data Respon Frekuensi Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

Skema	Frequency (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	98,9	100	99,99
Short Circuit	99,93	100,25	100,01
Open CB	99,99	100,12	100,03

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase di Bus3-1 untuk mewakili tegangan 0.42 kV pada detik ke 5, respon frekuensi yang dihasilkan pada main double busbar pada sisi pembangkit dapat dilihat pada gambar 4.180, mengalami kenaikan yang cukup aman dan dapat kembali kedalam kondisi normal pada detik ke 20.

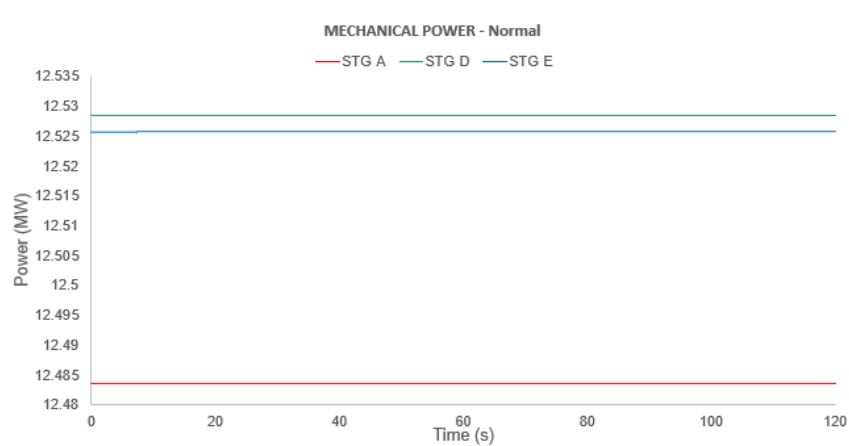
Sedangkan, setelah dilakukan mitigasi dengan melakukan *command open cb* selama 0,2 s setelah gangguan, maka respon frekuensi yang dihasilkan dapat dilihat bahwasanya frekuensi tidak mengalami kenaikan yang signifikan dan dapat kembali stabil pada detik ke-6.

**Gambar 4.118** Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV**Tabel 4.58** Data Respon Tegangan Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

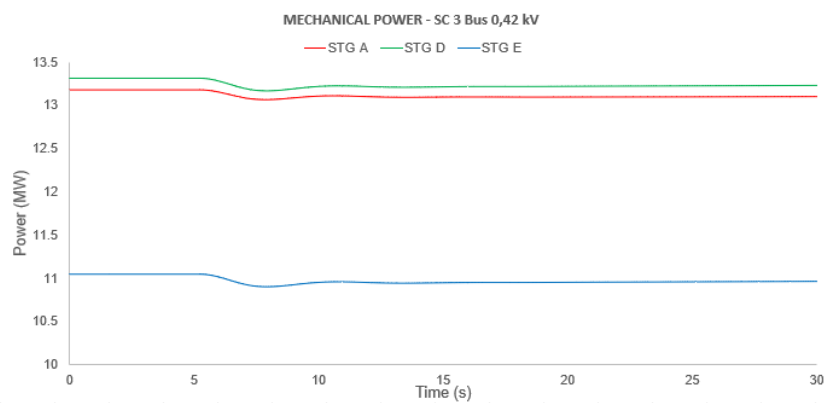
Skema	Voltage (%)		
	Lowest	Highest	Steady State
Normal Operation	99,6	99,6	99,6
Short Circuit	85,87	99,55	92,58
Open CB	99,93	100,25	100,01

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase di Bus3-1 untuk mewakili tegangan 0.42 kV pada detik ke 5, respon frekuensi yang dihasilkan pada main double busbar pada sisi pembangkit dapat dilihat pada gambar 4.181, mengalami penurunan yang cukup besar hingga mencapai 85%, apabila mengacu pada standard IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*, kondisi ini masih sudah bisa dikatakan aman karna respon yang dihasilkan berada diatas standard yang seharusnya yakni dibawah 90%. Akan tetapi waktu yang dibutuhkan oleh tegangan untuk kembali stabil membutuhkan waktu yang cukup lama.

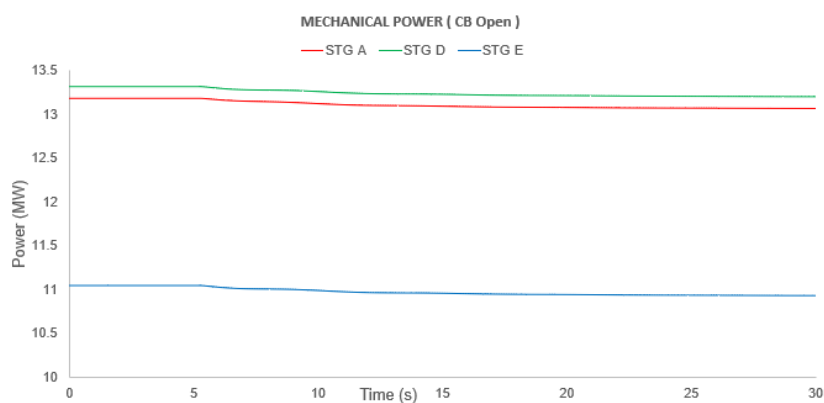
Namun, setelah pembukaan CB pada detik ke-5.2, sistem cenderung kembali normal dan mampu mengembalikan keseimbangan setelah gangguan tersebut dalam waktu yang sangat singkat. Dengan demikian sistem dinyatakan aman dan memenuhi standar operasi kontinu berdasarkan standard IEEE Std 1159-2019 *Voltage Magnitude Event*



Gambar 4.119 Respon Daya Mekanik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.120 Respon Daya Mekanik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



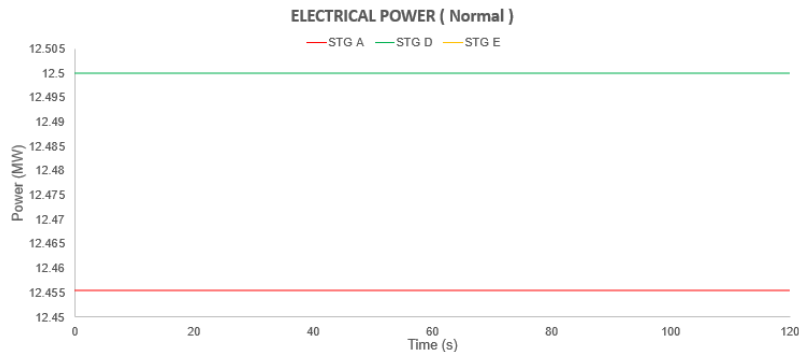
Gambar 4.121 Respon Daya mekanik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.59 Data Respon Daya Mekanik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

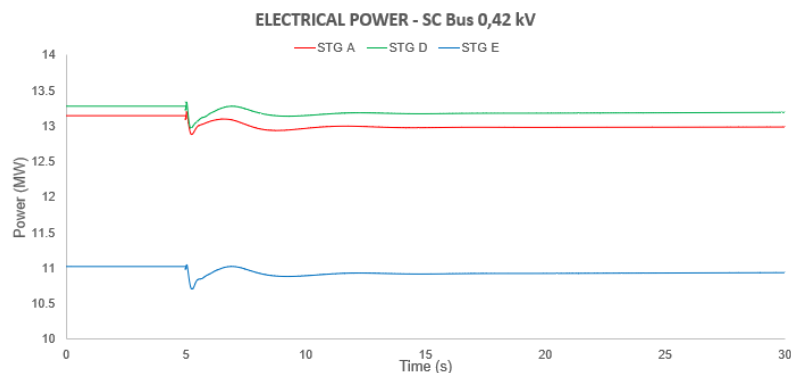
Skema		Mechanical Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,48	OFF	OFF	12,52	12,52
Short Circuit	Steady State (MW)	13,1	OFF	OFF	13,23	10,96
Open CB	Steady State (MW)	13,06	OFF	OFF	13,19	10,93

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada Bus3-1 untuk mewakili tegangan 0.42 kV, maka respon daya mekanik pada setiap pembangkit yang beroperasi mengalami penurunan, apabila hal ini dibiarkan maka akan berdampak kepada sistem dimana daya yang dibutuhkan oleh sistem tidak terpenuhi sehingga perlu dilakukannya mitigasi pembukaan cb secepat mungkin agar sistem tetap dapat terjaga kestabilannya. Dapat dilihat ketika terjadinya gangguan, daya mekanik pada masing masing pembangkit mengalami penurunan dan mulai kembali naik didetik 10, hal ini tentu saja dapat membahayakan sistem.

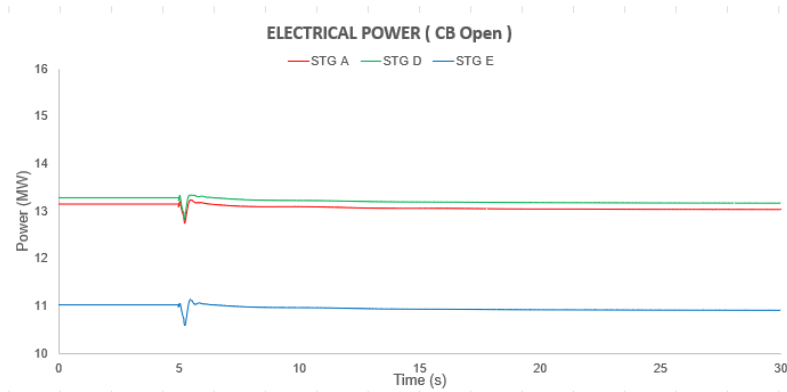
Setelah dilakukannya pembukaan cb di detik 5,2 setelah gangguan, maka dapat dilihat respon daya mekanik pada masing-masing pembangkit dapat kembali ke dalam kondisi normal dengan waktu yang lebih singkat. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.122 Respon Daya Elektrik Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.123 Respon Daya Elektrik Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



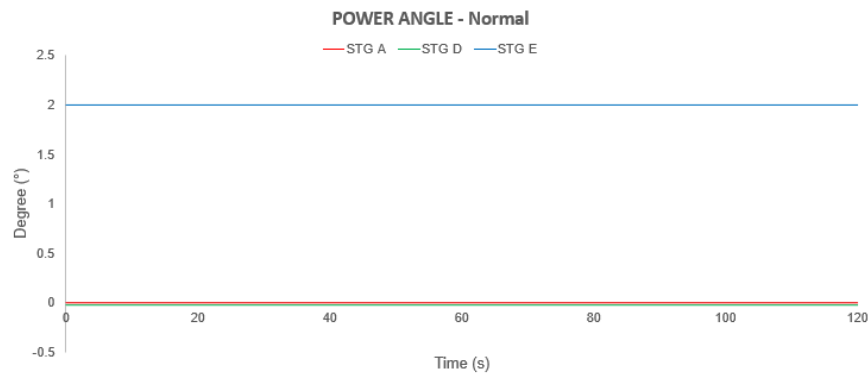
Gambar 4.124 Respon Daya Elektrik Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.60 Data Respon Daya Elektrik Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

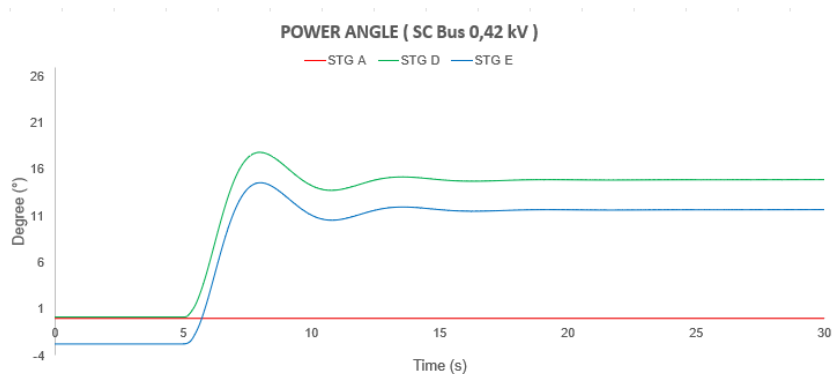
Skema		Electric Power (MW)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	12,45	OFF	OFF	12,5	12,5
Short Circuit	Steady State (MW)	12,98	OFF	OFF	13,19	10,93
Open CB	Steady State (MW)	13,03	OFF	OFF	13,16	10,91

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase pada Bus3-1 untuk mewakili tegangan 0.42 kV, maka respon daya elektrik pada setiap pembangkit yang beroperasi mengalami penurunan, apabila hal ini dibiarkan maka akan berdampak kepada sistem dimana daya yang dibutuhkan oleh sistem tidak terpenuhi sehingga perlu dilakukannya mitigasi pembukaan cb secepat mungkin agar sistem tetap dapat terjaga kestabilannya. Dapat dilihat ketika terjadinya gangguan, daya elektrik pada masing masing pembangkit mengalami penurunan dan mulai kembali naik didetik 10, hal ini tentu saja dapat membahayakan sistem.

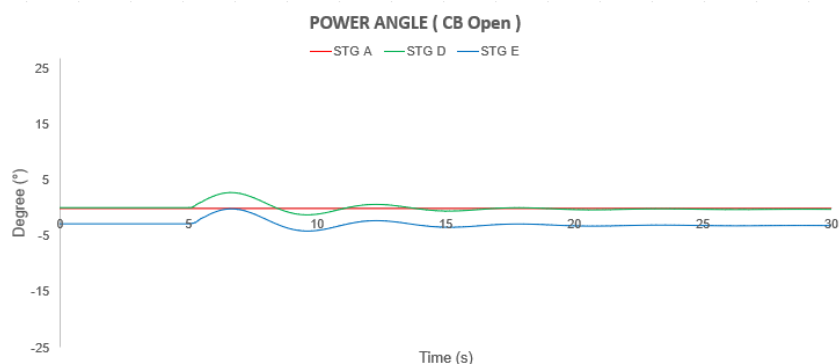
Setelah dilakukannya pembukaan cb di detik 5,2 setelah gangguan, maka dapat dilihat respon daya elektrik pada masing-masing pembangkit dapat kembali ke dalam kondisi normal dengan waktu yang lebih singkat. Dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.



Gambar 4.125 Respon Sudut Rotor Sebelum Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.126 Respon Sudut Rotor Setelah Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV



Gambar 4.127 Respon Sudut Rotor Setelah Dilakukannya Mitigasi Open CB

Tabel 4.61 Data Respon Sudut Rotor Ketika Mengalami Hubung Singkat Bus 0,42 kV

Skema		Power Angle (Degree)				
		51-G-101 A	51-G-101 B	51-G-101 C	51-G-101 D	51-G-101 E
Normal Operation	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	-0,023	1,99
Short Circuit	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	14,91	11,69
Open CB	Steady State (MW)	0	OFF	OFF	-0,146	-3,07

Respon sudut tegangan STG A yang bernilai 0° disebabkan karena STG A menjadi sudut referensi perhitungan relative untuk generator lainnya. Dalam sistem kelistrikan, sudut rotor biasanya diukur relatif terhadap referensi tertentu. Oleh sebab itu beberapa generator mengalami perubahan sudut rotor.

Ketika terjadinya gangguan hubung singkat 3 phase, dapat dilihat sudut rotor masing-masing generator mengalami kenaikan yang cukup signifikan, Lalu selanjutnya ketika dilakukan pembukaan cb pada detik ke-5,2, maka dapat dilihat respon sudut rotor masing-masing generator dapat kembali turun dan stabil kembali dalam keadaan normal operasi. Dengan adanya mitigasi pembukaan cb yang cepat ini dapat disimpulkan bahwa sistem mampu menanggapi gangguan dengan baik dan tetap mempertahankan sinkronisasi, menunjukkan keandalan dalam operasi sistem.

4.5 Rekapitulasi Data

Setelah dilakukannya simulasi pada bagian sub-bab sebelumnya, berikut ini rekapitulasi data yang didapatkan berupa data respon frekuensi dan tegangan ketika terjadinya gangguan generator outage, dan Short Circuit.

4.5.1 Rekapitulasi Respon Frekuensi

Tabel 4.62 Data Rekapitulasi Respon Frekuensi

Kasus Generator Outage					
Operated Power	Skenario Kasus	Tanpa LS (%)		LS (%)	
		Min	Steady	Min	Steady
4 Generator	STG E Trip	99,16	99,98	99,41	99,99
	STG D Trip	98,03	99,96	98,39	99,99
3 Generator	STG E Trip	98,97	99,2	99,02	99,72

4.5.2 Rekapitulasi Respon Tegangan

Tabel 4.63 Data Rekapitulasi Tegangan

Kasus Generator Outage					
Operated Power	Skenario Kasus	Tanpa LS (%)		LS (%)	
		Min	Steady	Min	Steady
4 Generator	STG E Trip	95,36	96,24	97,66	98,37
	STG D Trip	83,4	91,23	91,75	98,72
3 Generator	STG E Trip	91,3	95,63	94,33	98,67

4.5.3 Rekapitulasi Respon Trafo PLN

Tabel 4.64 Data Rekapitulasi Respon Trafo PLN

Kasus Generator Outage					
Operated Power	Skenario Kasus	Tanpa LS (MVA)		LS (MVA)	
		Min	Steady	Min	Steady
4 Generator	STG E Trip	26,46	26,45	26,46	26,45
	STG D Trip	26,46	26,45	26,46	26,45
3 Generator	STG E Trip	26,46	26,45	26,46	26,45

4.5.4 Rekapitulasi Kasus Short Circuit

1. 4 Generator aktif

Tabel 4.65 Data Rekapitulasi 4 STG aktif Dalam Kasus Short Circuit

Level Tegangan	Frekuensi (%)		
	Lowest	Highest	Steady
20	99,57	119,95	99,57
10	91,5	119,88	91,5
3.15	98,61	105,35	99,99
0.42	99,96	100,16	99,99
Level Tegangan	Tegangan (%)		
	Lowest	Highest	Steady
20	0	100,36	0
10	0	100,36	0
3.15	65,82	100,36	78,79
0.42	89,41	100,36	93,75

2. 3 Generator aktif

Tabel 4.66 Data Rekapitulasi 3 STG aktif Dalam Kasus Short Circuit

Level Tegangan	Frekuensi (%)		
	Lowest	Highest	Steady
20	99,57	119,84	99,57
10	91,4	119,92	91,4
3.15	98,61	105,35	99,97
0.42	99,93	100,25	100,01
Level Tegangan	Tegangan (%)		
	Lowest	Highest	Steady
20	0	99,55	0
10	0	99,6	0
3.15	65,82	100,36	78,79
0.42	85,87	99,55	92,58

BAB 5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang sudah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Sistem kelistrikan kilang memiliki jumlah daya pembangkitan yang cukup besar dibandingkan dengan daya kebutuhan beban. Secara teoritis, beban seluruh sistem dapat disuplai hanya dengan menggunakan tiga STG apabila tidak diintegrasikan dengan PLN
2. Implementasi skema pelepasan beban berbasis status terbukti efektif dalam memulihkan kestabilan sistem dimana strategi ini mampu mengembalikan frekuensi dan tegangan ke batas nominalnya sesuai dengan standar IEEE.
3. Karakteristik STG memiliki kemampuan rampup yang relatif lambat dan sangat bergantung pada buffer steam yang tersedia. Kemampuan rampup ini mempengaruhi proses recovery frekuensi pada kejadian transien.
4. Penggunaan Skema LS dengan trigger status CB STG adalah hal wajib bagi sistem Pertamina RU VI Balongan. Dengan demikian, mekanisme penggunaan skema LS tersebut merupakan hal yang critical dan harus dapat bekerja dengan baik ketika dibutuhkan.
5. PLN dan Pembangkit tidak bisa disinkronkan karena nilai arus hubung singkat pada *double busbar* ketika jika disinkronkan akan lebih besar dibandingkan nilai ratingnya sehingga dalam pengerjaan tugas akhir ini, PLN digunakan untuk mengamankan beban-beban penting agar tetap dapat beroperasi ketika terjadinya gangguan di sisi pembangkit.

5.2 Saran

Dari hasil analisis yang telah dilakukan, terdapat saran yang dapat diberikan untuk meningkatkan keandalan sistem kelistrikan PT Pertamina Balongan RU VI adalah sebagai berikut.

1. Analisis yang dilakukan dapat merekomendasikan pada PT. Pertamina RU VI Balongan dalam mempertimbangkan skema pelepasan beban mana yang lebih efisien digunakan.
2. Dalam melakukan pelepasan beban, perlu memperhatikan urutan prioritas beban mana yang tidak boleh dilepas
3. Dalam kasus hubung singkat, apabila tegangan mengalami penurunan yang cukup signifikan, disarankan untuk memberikan sumber DC maupun sumber UPS, hal ini bertujuan agar dapat membantu pemulihan dari penurunan tegangan yang cukup curam dan dapat mengembalikan kestabilan sistem dengan cepat.
4. Sistem kelistrikan pada PT Pertamina RU VI Balongan dapat menerapkan sistem load shedding metode status dan UFR secara bersamaan, sehingga ketika pada kondisi terburuk saat terjadi gangguan load shedding metode status gagal berfungsi masih terdapat *back-up* dari metode UFR untuk mengembalikan kestabilan sistem.

(halaman ini sengaja di kosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- [1] C. S. Putri and R. Vikaliana, "The Plan and Realization Evaluation of Supply Crude Oil Activities at PT Kilang Pertamina International - Refinery Unit VI Balongan," *Berk. SAINSTEK*, vol. 11, no. 1, p. 68, May 2023, doi: 10.19184/bst.v11i1.37998.
- [2] "IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants." IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.1987.79552.
- [3] "Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di PT. Pertamina RU IV Cilacap Akibat Integrasi dengan PLN oleh Muhammad Syafrizal Thesis.pdf."
- [4] F. Ariansyah, "Analisis Kestabilan Transien dan Pelepasan Beban Pada Sistem Integrasi 33 KV PT. Pertamina RU IV Cilacap akibat Penambahan Beban RFCC dan PLBC," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 1, Mar. 2016, doi: 10.12962/j23373539.v5i1.15169.
- [5] E. Kyriakides and M. Polycarpou, Eds., *Intelligent Monitoring, Control, and Security of Critical Infrastructure Systems*, vol. 565. in *Studies in Computational Intelligence*, vol. 565. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. doi: 10.1007/978-3-662-44160-2.
- [6] N. Hatziaargyriou *et al.*, "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 4, pp. 3271–3281, Jul. 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041774.
- [7] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. in The EPRI power system engineering series. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [8] M. Kumar, C. Kumar, and R. K. Saxena, "Review of Voltage Limit and Transien Voltage Stability Criteria for Power System Planning," in *2023 3rd International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET)*, Patna, India: IEEE, Dec. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICEFEET59656.2023.10452219.
- [9] X. Li, Z. Li, L. Guan, L. Zhu, and F. Liu, "Review on Transien Voltage Stability of Power System," in *2020 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC)*, Chengdu, China: IEEE, Nov. 2020, pp. 940–947. doi: 10.1109/iSPEC50848.2020.9351059.
- [10] "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004, doi: 10.1109/TPWRS.2004.825981.
- [11] Y. ALShamli, N. Hosseinzadeh, H. Yousef, and A. Al-Hinai, "A review of concepts in power system stability," in *2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition*, Muscat, Oman: IEEE, Feb. 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/IEEEGCC.2015.7060093.
- [12] "2210100009-Undergraduate Thesis.pdf."
- [13] A. D. Novfowan, W. Kusuma, and M. Mieftah, "Analisis Stabilitas Transien Tegangan dan Frekuensi pada Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 8, no. 1, pp. 28–33, May 2023, doi: 10.33795/elposys.v8i1.31.
- [14] M. Marhatang, M. Saini, M. I. Fauzan, and E. Erniwati, "Analisis Kestabilan Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban Pada Jaringan Listrik Wilayah Sulselbar Setelah Penambahan PLTU Punagaya," *J. Tek. Mesin Sinergi*, vol. 18, no. 1, p. 113, Sep. 2020, doi: 10.31963/sinergi.v18i1.2247.
- [15] T. Rubianto, "Studi Load Shedding pada Sistem Kelistrikan Pengeboran Minyak Lepas Pantai, Kasus di Perusahaan X".
- [16] "IEEE Std 1159-2019, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," 2019.
- [17] *C37.106-2022 - IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants*. IEEE, 2023.

(halaman ini sengaja di kosongkan)

LAMPIRAN

1. Data beban yang di Load Shedding
 - a. 4 Generator STG beroperasi (STG C Off)
 - STG E Trip

	Substation	4 Generator: STG E TRIP			
		LS STATUS: 6,49 MW			
		Jenis	ID	Daya (kW)	TOTAL (MW)
SS01A	01-PMC2-01B	FUSE	FS01B5	257.8	6,59
		FUSE	FS01B6	720.9	
	01-PMC3-01B	LVCB	CB5-1	140.9	
	01-PMC3-01A	LVCB	CB3-1	221	
	01-PMC3-02B-N	LVCB	CB10-1	210.9	
	01-PMC3-02A-N	LVCB	CB6-1	542.8	
	Lump FO-PTR2-01	HVCB	CB9	250	
SS15	15-PMC2-01B LOAD	FUSE	FS15B1	120.2	
		FUSE	FS15B6	78.7	
	15-PMC3-01B-N	LVCB	CB41	237.2	
SS21	21-PMC3-01B	LVCB	CB25	323.3	

		FUSE	FS17B8	252
		FUSE	FS17A1	252

- STG D dan E Trip

	Substation	4 Generator: STG D dan E TRIP			
		LS STATUS: 16.7 MW			
		Jenis	ID	Daya (kW)	TOTAL (MW)
	21-PMC3-02	LVCB	CB26	25.1	16,75
SS22	22-PMC2-01B	FUSE	FS22B1	64.5	
			FS22B6	7.37	
			FS22B7	252.2	
			FS22B8	249.5	
	22-PMC3-01A	LVCB	CB30	428.4	
	22-PMC3-01B	LVCB	CB31	313.8	
SS17	17-PMC2-01B	FUSE	FS17B1	15	
			FS17B2	26.4	
			FS17B8	252	
			FS17B10	47	
			FS17B12	26.3	
			FS17B14	1108	
	17-PMC3-01B	LVCB	CB14	380.6	
	17-PMC3-03	LVCB	17-PSW3-03	34.5	
	33-F-101	LVCB	CB142	1067	
	17-PMC2-02B	FUSE	FS17B21	240.2	
			FS17B22	53.6	
			FS17B23	1081	

			FS17B24	108.1
	17-PMC3-02B	LVCB	CB17	473.1
SS18	18-PMC2-01A	FUSE	FS18A1	86.3
			FS18A3	9.31
	18-PMC2-01B	FUSE	FS18B2	74.8
			FS18B3	93.1
			FS18B4	124.2
			FS18B5	163.4
			FS18B6	100.4
		LVCB	CB140	879.5
		LVCB	CB109	1162
	18-PMC3-01A	LVCB	CB18	725.4
	18-PMC3-01B	LVCB	CB19	614.4
	18-PMC3-03	LVCB	CB21	77.9
SS19	19-PMC2-01A	FUSE	FS19A2	92.2
			FS19A3	92.2
			FS19A5	822.5
			FS19A6	279.3
	19-PMC2-01B	FUSE	FS19B1	302.7
			FS19B2	91.1
			FS19B3	91.1
			FS19B7	592.2
	19-PMC3-01A	LVCB	CB22	252.7
	19-PMC3-01B	LVCB	CB23	370.1

	19-PMC3-03	LVCB	CB29	37
SS15	15-PMC3-01B-N	LVCB	CB41	237.2

- b. 3 Generator STG beroperasi (STG B dan C Off)
- STG E Trip

		3 Generator: STG E TRIP				
		LS STATUS: 10 MW				
		ID Beban	Jenis	ID	Daya (kW)	TOTAL (MW)
	21-PMC3-02		LVCB	CB26	25.1	10,1757
SS22	22-PMC2-01B	42-P-205B	FUSE	FS22B1	64.5	
		42-P-107B		FS22B6	7.37	
		42-P-207B		FS22B7	252.2	
		42-P-301C		FS22B8	249.5	
	22-PMC3-01A		LVCB	CB30	428.4	
	22-PMC3-01B		LVCB	CB31	313.8	
SS17	17-PMC2-01B	31-P-103B-M	FUSE	FS17B1	15	
		31-P-105B-M		FS17B2	26.4	
		31-K-101 B		FS17B8	252	
		31-P-101 B		FS17B10	47	
		31-P-105 B		FS17B12	26.3	
		32-K-102 B		FS17B14	1108	
		LVCB	CB14	380.6		

SS18	17-PMC3-01B				
	17-PMC3-03	17-PMC3-03	LVCB	17-PSW3-03	34.5
	33-F-101	33-F-101	LVCB	CB142	1067
	17-PMC2-02B	31-K-101B-M	FUSE	FS17B21	240.2
		31-P-101B-M		FS17B22	53.6
		32-K-102B-M		FS17B23	1081
		32-K-102C-M		FS17B24	108.1
	17-PMC3-02B		LVCB	CB17	473.1
	18-PMC2-01A	34-P-105A	FUSE	FS18A1	86.3
		35-P-102B		FS18A3	9.31
	18-PMC2-01B	35-P-101A	FUSE	FS18B2	74.8
		35-P-102A		FS18B3	93.1
		36-P-101A		FS18B4	124.2
		37-P-101A		FS18B5	163.4
		37-P-102A		FS18B6	100.4
	18-PMC3-01B		LVCB	CB19	614.4

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Bukittinggi, 26 Mei 2003. penulis merupakan anak pertama dari 5 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal yaitu di TK Islam Al ishlah, SD Islam Al Ishlah, SMP Islam Al Ishlah, dan SMAN 1 Bukittinggi. Setelah lulus dari SMAN tahun 2021, penulis diberikan kesempatan dan diterima di Jurusan Teknik Elektro ITS pada tahun 2021 melalui jalur SNMPTN dan terdaftar dengan NRP 5022211014.

Di Departemen Teknik Elektro penulis sempat aktif di beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh departemen, mengikuti beberapa kegiatan event sebagai volunteer dan panitia, serta aktif sebagai Asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga. Penulis juga diberikan amanah dan kepercayaan untuk menjadi Koordinator Asisten Lab periode 2024/2025. Penulis juga telah mengikuti beberapa kegiatan akademik diluar yaitu terdaftar sebagai salah satu mahasiswa MSIB batch 7 dan Magenta di Petrokimia Gresik dengan total magang selama satu tahun. Penulis dapat dihubungi melalui zakinazyu26@gmail.com