



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 091399

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN PERANCANGAN
PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM KELISTRIKAN
PT SEMEN TONASA**

**Moh. Riscy Madina
NRP 2212 105 093**

**Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014**



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 091399

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS AND LOAD SHEDDING MECHANISM AT PT. SEMEN TONASA

Moh. Riscy Madina
NRP 2212 105 093

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

**ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN
PERANCANGAN PELEPASAN BEBAN PADA
SISTEM KELISTRIKAN PT SEMEN TONASA**

TUGAS AKHIR

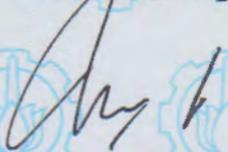
**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT
NIP. 196603181990101001


Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng
NIP. 197309271998031004



ABSTRAK

PT. SEMEN TONASA merupakan salah satu unit pengolahan semen yang berada di daerah Pangkep, Sulawesi Selatan. Untuk dapat menunjang kegiatan operasionalnya, PT. SEMEN TONASA mengoperasikan 4 unit *steam turbin generator* dengan kapasitas masing-masing 2x35 MW dan 2x25 MW serta terhubung dengan *grid* PLN sebesar 1500 MVA Sc. Pada PT. SEMEN TONASA, stabilitas transien belum dianalisis secara mendalam sehingga perlu dilakukan studi stabilitas transien untuk mengetahui kestabilan sistem saat terjadi gangguan transien. Pada tugas akhir ini difokuskan pada analisis kestabilan transien meliputi kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi dan kestabilan sudut rotor saat terjadi *generator outage*, *motor starting* dan gangguan hubung singkat. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kasus lepasnya generator mengakibatkan sistem tidak stabil. Untuk mengembalikan kestabilan sistem, pada kasus lepasnya generator (BTGE.GEN01) memerlukan pelepasan beban 2 tahap dengan melepas 25.225% dari total beban (27.3304 MW). Sedangkan pada kasus lepasnya generator (BTGN.GEN01) memerlukan pelepasan beban 3 tahap dengan melepas 48.075% dari total beban (54.7444 MW). Saat hubung singkat pada level tegangan 11 KV mengakibatkan sistem tidak stabil sehingga perlu dilakukan pelepasan beban 3 tahap. Selain itu pada kasus hubung singkat dilevel tegangan 70 KV, setiap nilai level tegangan akan turun setelah terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada level tegangan 70 KV, namun setelah CB T5.CB70KV.06 open maka nilai tegangan sesaat menjadi 137,571% dan akan kembali *steady state* pada 100,135%. Pada kasus *motor starting* tidak terlalu berpengaruh pada stabilitas sistem, penurunan tegangan terendah pada 96,9587% dan stabil pada 99.3167%.

Kata Kunci : kestabilan transien, gangguan transien, pelepasan beban.



Halaman ini sengaja dikosongkan

ABSTRACT

PT. SEMEN TONASA is one of the cement unit that is owned by PT. SEMEN TONASA, Pangkep Sulawesi Selatan. To be able to support its operation, PT. SEMEN TONASA operates 4 units of steam turbine generator with a capacity of 2x35 MW and 2x25 MW and 1 connection to PLN 1500MV ac. In PT. SEMEN TONASA, transient stability has not been analyzed in depth so that the transient stability studies need to be conducted to determine the stability of the system during a transient stability disturbance. In this final project, the analysis focused on the transient stability include voltage stability, frequency stability and rotor angle stability during generator outage, motor starting and Short circuit. From the simulation result show that in the case of generator outage resulting in an unstable system. To restore the system stability, in case of 1 generator (BTGE.GEN01) outage require 2 step loadshedding by removing 25.225% of total loads (27.3304 MW). While in the case of 2 generators (BTGN.GEN01) outage require 3 step loadshedding by removing 48.075% of total loads (54.7444 MW). In the case of short circuit at voltage level 11 KV result in unstable system that is necessary to do 3 step loadshedding. In addition short circuit at voltage level 70 kV, each voltage value will be drop after short circuit 3 phase in 70 Kv. But after CB T5.CB70KV.06 open then voltage value become 137,571% and will be steady state at 100,135% . In the case of motor starting, the voltage dropped to 96,9587% and stabilized at 99.3167%.

Keywords : *transient stability, transient disturbance, load shedding.*



Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas berkat dan rahmat-Nya sehingga saya selaku penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul :

ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN PERANCANGAN PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM KELISTRIKAN PT SEMEN TONASA

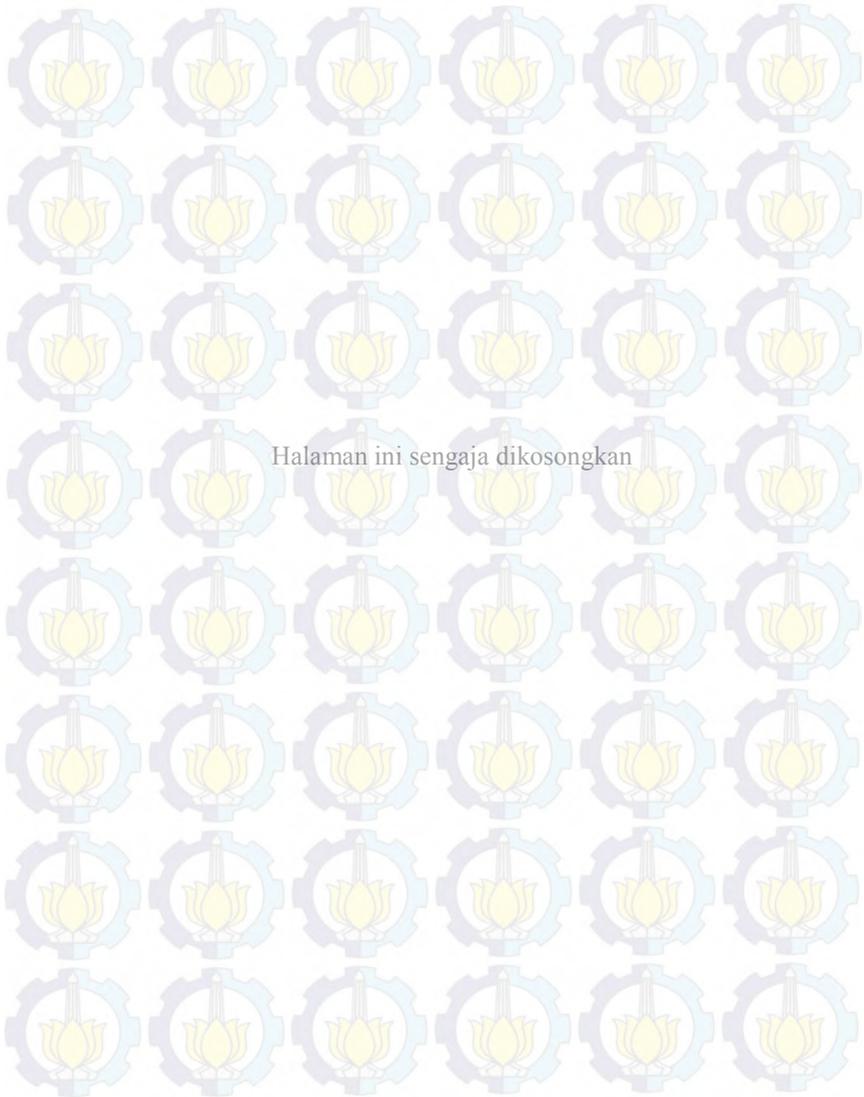
Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT yang tanpaNya penulis tidak mungkin bisa menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara.,MT dan Dr.Eng. Ardyono Priyadi ST, M.Eng selaku dosen pembimbing tugas akhir atas bimbingan, perhatian, pendapat serta ilmu yang diberikan kepada penulis selama proses pengerjaan tugas akhir ini.
3. Kedua orang tua saya yang selalu memberikan doa dan semangat untuk selalu mengingatkan saya menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Teman-teman Lintas jalur '12' dan para asisten LAB LIPIST B204 bidang studi sistem tenaga yang telah banyak membantu selama proses pengerjaan tugas akhir
5. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan tugas akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi pembaca. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juli 2014

Penyusun



DAFTAR ISI

| | HALAMAN |
|---|---------|
| JUDUL | |
| LEMBAR PERNYATAN | |
| LEMBAR PENGESAHAN | |
| ABSTRAK | i |
| ABSTRACT | iii |
| KATA PENGANTAR | v |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL | xix |
| BAB I PENDAHULUAN | |
| 1.1. Latar Belakang Masalah | 1 |
| 1.2. Permasalahan | 2 |
| 1.3. Tujuan..... | 2 |
| 1.4. Metodologi..... | 3 |
| 1.5. Sistematika..... | 4 |
| 1.6. Relevansi | 5 |
| BAB II KESTABILAN TRANSIEN | |
| 2.1. Kestabilan Sistem Tenaga | 7 |
| 2.1.1. Kestabilan Sudut Rotor | 8 |
| 2.1.1.1. Hubungan antara sudut rotor dan daya | 8 |
| 2.1.1.2. Fenomena Kestabilan | 10 |

| | |
|--|----|
| 2.1.2. Kestabilan Tegangan | 11 |
| 2.1.3. Kestabilan Frekuensi | 12 |
| 2.2. Kestabilan Transien..... | 12 |
| 2.2.1. Hubung Singkat..... | 12 |
| 2.2.2. <i>Motor Starting</i> | 13 |
| 2.2.3. Penambahan Beban secara Tiba-Tiba | 13 |
| 2.3. Persamaan Ayunan Generator | 14 |
| 2.4. Sistem Pengoperasian <i>Load Shedding</i> | 16 |
| 2.4.1. Pelepasan Beban Secara Manual..... | 18 |
| 2.4.2. Pelepasan Beban Secara Otomatis | 18 |
| 2.5. Standar yang Digunakan untuk Analisis Kestabilan Transien.... | 19 |
| 2.5.1. Standar Frekuensi untuk <i>Steam Turbin Generator</i> (IEEE Std C37.106-2003) | 19 |
| 2.5.2. Standar Tegangan | 19 |
| 2.5.2. Standar Pelepasan Beban | 20 |
| BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT.SEMEN TONASA | |
| 3.1. Metode Pelaksanaan Studi..... | 23 |
| 3.2. Sistem Kelistrikan Di PT.SEMEN TONASA | 24 |
| 3.3. Data Kelistrikan PT.SEMEN TONASA | 23 |
| 3.3.1. Jumlah Total Pembangkitan,Pembebanan dan Permintaan PT.SEMEN TONASA..... | 24 |
| 3.3.2. Sistem Pembangkitan..... | 24 |
| 3.3.3. Sistem Distribusi..... | 26 |
| 3.3.4. Data Beban..... | 39 |
| 3.4. Pemodelan Sistem | 39 |

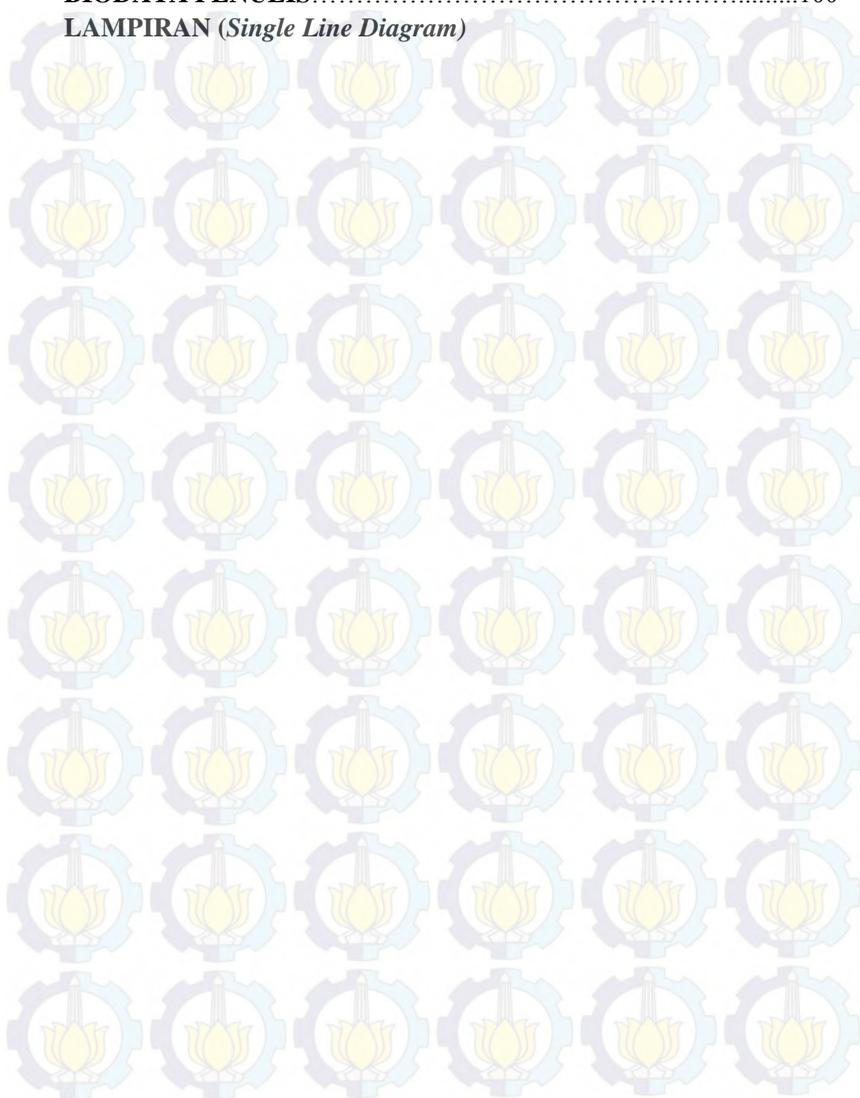
| | |
|-------------------------------|----|
| 3.4.1. Model Generator..... | 39 |
| 3.4.2. Inertia Generator..... | 40 |
| 3.4.3. Model Exciter..... | 41 |
| 3.4.4. Model Governor..... | 42 |

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. SEMEN TONASA

| | |
|--|----|
| 4.1. Pemodelan sistem kelistrikan PT.SEMEN TONASA | 47 |
| 4.2. Total pembangkitan dan beban PT.SEMEN TONASA..... | 47 |
| 4.3. Studi kasus kestabilan transien | 47 |
| 4.4. Simulasi dan analisis kestabilan transien..... | 50 |
| 4.4.1. Simulasi kestabilan transien untuk kasus <i>generator outage</i> | 50 |
| 4.4.1.1. Studi kasus Gen Out 1 : Generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem (t=5 detik) | 50 |
| 4.4.1.2. Studi kasus Gen Out 1 LS: Generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem (t=5 detik) dan diikuti load shedding..... | 52 |
| 4.4.1.3. Studi kasus Gen Out 1 LS: Generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem (t=5 detik) dan mekanisme load shedding menggunakan status | 57 |
| 4.4.1.4. Studi kasus Gen Out 2 : Generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem (t=5 detik) | 59 |
| 4.4.1.5. Studi kasus Gen Out 2 LS: Generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem (t=5 detik) dan diikuti load shedding..... | 61 |
| 4.4.1.6. Studi kasus Gen Out 2 LS: Generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem (t=5 detik) dan mekanisme load shedding menggunakan status | 68 |
| 4.4.2. Simulasi kestabilan transien untuk kasus <i>short circuit</i> | 70 |

| | |
|---|----|
| 4.4.2.1. Studi Kasus SC 0.4 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 0.4 kV bus25 (t=2 detik), CB T5.GS51.CB6KV.03 open (t=2.3 detik)..... | 71 |
| 4.4.2.2. Studi Kasus SC 6,3 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus SG1 (t=2 detik), CB HVSG 3 open (t=2.3 detik) | 73 |
| 4.4.2.3. Studi Kasus SC 11 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 11 kV BTGN.G01.BB11kV.02 (t=2 detik), CB BTGN.CB11KV.G01.01 open (t=2.1 detik)..... | 75 |
| 4.4.2.4. Studi Kasus SC 11 kV LS1: Hubung singkat 3 fasa pada bus 11 kV BTGN.G01.BB11kV.02 (t=2 detik), CB BTGN.CB11KV.G01.01 open (t=2.1 detik) diikuti load shedding..... | 78 |
| 4.4.2.5. Studi Kasus SC 11 kV LS1: Hubung singkat 3 fasa pada bus 11 kV BTGN.G01.BB11kV.02 (t=2 detik), CB BTGN.CB11KV.G01.01 open (t=2.2 detik) menggunakan status..... | 87 |
| 4.4.2.6. Studi Kasus SC 22 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 22 kV DIST.EBB22KV.02 (t=2 detik), CB DIST.CB70KVE.05 open (t=2.3 detik)..... | 90 |
| 4.4.2.7. Studi Kasus SC 70 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 70 kV 580 TB 02 (t=2 detik), CB T5.CB70KV.06 open (t=2.3 detik)..... | 92 |
| 4.4.3. Simulasi kestabilan transien untuk kasus <i>motor starting</i> | 94 |
| 4.4.3.1. Studi kasus Mstart: Motor M532FN11 7,6 MW starting (t=2 detik)..... | 94 |
| BAB 5 PENUTUP | |
| Kesimpulan..... | 97 |
| Saran..... | 97 |

| | |
|--|-----|
| DAFTAR PUSTAKA | 99 |
| BIODATA PENULIS | 100 |
| LAMPIRAN (<i>Single Line Diagram</i>) | |





DAFTAR GAMBAR

| | Halaman |
|---|---------|
| Gambar 2.1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik | 8 |
| Gambar 2.2. Diagram impedansi sistem dua mesin | 9 |
| Gambar 2.3. Model ideal sistem dua mesin | 9 |
| Gambar 2.4. Diagram <i>Phasor</i> Sistem Dua Mesin | 10 |
| Gambar 2.5. Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban | 16 |
| Gambar 2.6. Batas Operasi Frekuensi Abnormal untuk <i>Steam Turbin Generator</i> | 19 |
| Gambar 2.7. Definisi <i>Voltage Magnitude Event</i> berdasarkan standar IEEE 1159-195 | 20 |
| Gambar 3.1. Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi | 23 |
| Gambar 3.2. Diagram Blok <i>Exciter</i> Tipe ST1 | 42 |
| Gambar 3.3. Diagram Blok <i>Governor</i> Tipe 505 | 44 |
| Gambar 3.4. Diagram Blok <i>Governor</i> 2301 | 45 |
| Gambar 4.1. Respon sudut rotor saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem | 51 |
| Gambar 4.2. Respon frekuensi saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem | 51 |
| Gambar 4.3. Respon tegangan saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem | 52 |
| Gambar 4.4. Respon sudut rotor saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 | 53 |
| Gambar 4.5. Respon frekuensi saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 | 53 |
| Gambar 4.6. Respon tegangan saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 | 54 |
| Gambar 4.7. Respon sudut rotor saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 dan tahap 2 | 55 |
| Gambar 4.8. Respon frekuensi saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 dan tahap 2 | 55 |

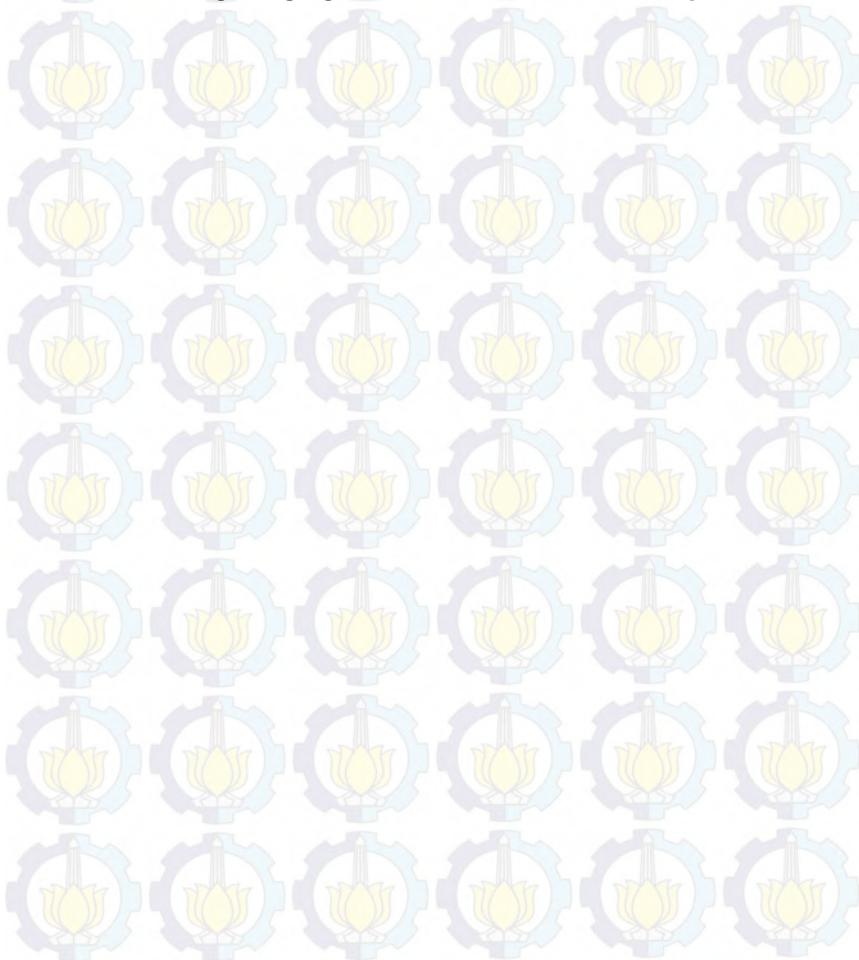
| | |
|---|----|
| Gambar 4.9. Respon frekuensi sistem sebelum dan setelah dilakukan <i>load shedding</i> | 56 |
| Gambar 4.10. Respon tegangan saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 dan tahap 2..... | 56 |
| Gambar 4.11. Respon sudut rotor saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status..... | 58 |
| Gambar 4.12. Respon frekuensi saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status..... | 58 |
| Gambar 4.13. Respon tegangan saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status..... | 56 |
| Gambar 4.14. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01lepas dari sistem..... | 60 |
| Gambar 4.15. Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem..... | 60 |
| Gambar 4.16. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01lepas dari sistem..... | 61 |
| Gambar 4.17. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1..... | 62 |
| Gambar 4.18. Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 | 62 |
| Gambar 4.19. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 | 63 |
| Gambar 4.20. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 dan 2..... | 64 |
| Gambar 4.21 Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 dan 2..... | 64 |
| Gambar 4.22 Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1 dan 2..... | 65 |
| Gambar 4.23. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1,2 dan 3..... | 66 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.24. Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1, 2 dan 3 | 66 |
| Gambar 4.25. Respon frekuensi sistem sebelum dan setelah dilakukan <i>load shedding</i> | 67 |
| Gambar 4.26. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan <i>load shedding</i> tahap 1, 2 dan 3 | 67 |
| Gambar 4.27. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status | 69 |
| Gambar 4.28. Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status | 69 |
| Gambar 4.29. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status..... | 70 |
| Gambar 4.30. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada busbus25 dan CB T5.GS51.CB6KV.03 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 71 |
| Gambar 4.231 Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus bus25 dan CB T5.GS51.CB6KV.03 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 72 |
| Gambar 4.32. Respon respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus bus25 dan CB T5.GS51.CB6KV.03 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 72 |
| Gambar 4.33. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus SG1 dan CB HVSG 3 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan. . | 73 |
| Gambar 4.34. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus SG1 dan CB HVSG 3 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan. . | 74 |
| Gambar 4.35. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus SG1 dan CB HVSG 3 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan. . | 75 |
| Gambar 4.36. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 76 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.37. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 77 |
| Gambar 4.38. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 77 |
| Gambar 4.39. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1..... | 79 |
| Gambar 4.40. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1..... | 80 |
| Gambar 4.41. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1..... | 81 |
| Gambar 4.42. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1 dan tahap 2..... | 81 |
| Gambar 4.43. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1 dan tahap 2..... | 82 |
| Gambar 4.44. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1 dan tahap 2..... | 83 |
| Gambar 4.45. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1, tahap 2 dan tahap 3..... | 84 |
| Gambar 4.46. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1, tahap 2 dan tahap 3..... | 85 |

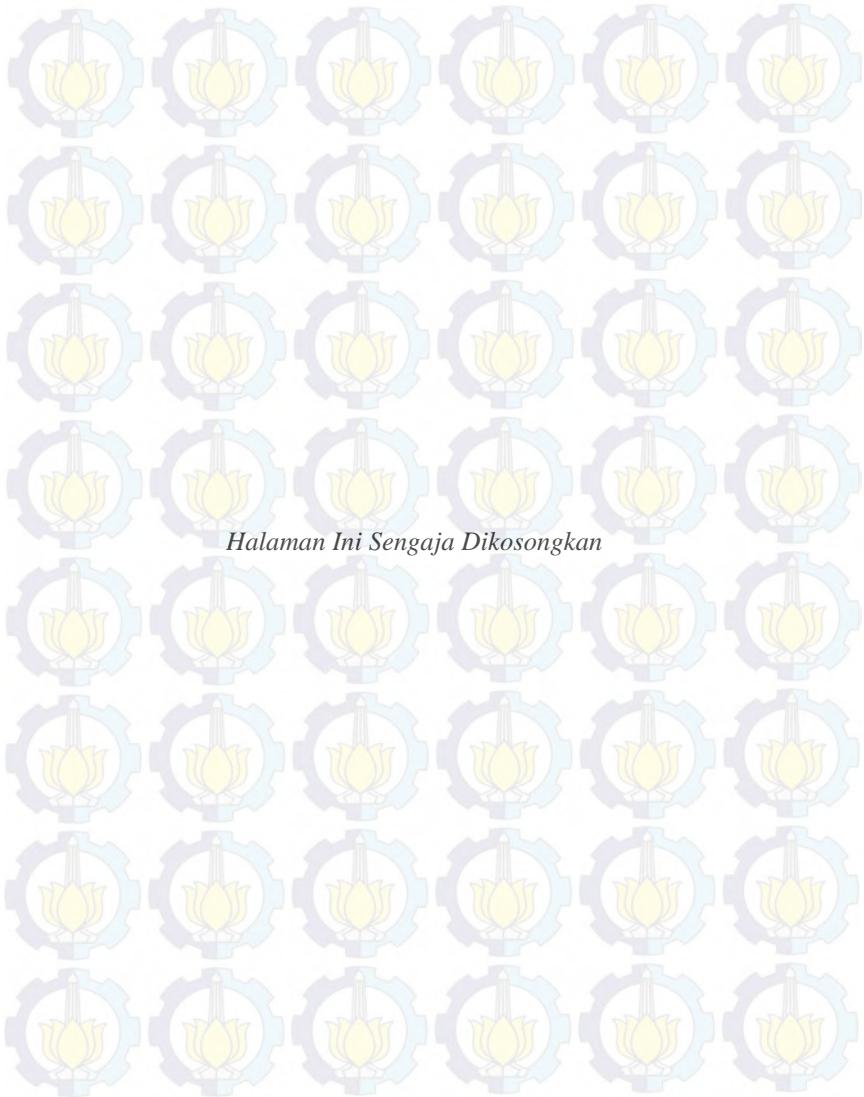
| | |
|--|----|
| Gambar 4.47. Respon frekuensi sistem sebelum dan setelah dilakukan <i>load shedding</i> | 85 |
| Gambar 4.48. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan diikuti <i>load shedding</i> tahap 1, tahap 2 dan tahap 3..... | 86 |
| Gambar 4.49. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status | 87 |
| Gambar 4.50. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status..... | 88 |
| Gambar 4.51. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan dan dilanjutkan dengan mekanisme <i>load shedding</i> menggunakan status..... | 89 |
| Gambar 4.52. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus DIST.EBB22KV.02 dan CB DIST.CB70KVE.05 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 90 |
| Gambar 4.53. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus DIST.EBB22KV.02 dan CB DIST.CB70KVE.05 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 91 |
| Gambar 4.54. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus DIST.EBB22KV.02 dan CB DIST.CB70KVE.05 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 91 |
| Gambar 4.55. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 580 TB 02 dan CB T5.CB70KV.06 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 92 |
| Gambar 4.56. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 580 TB 02 dan CB T5.CB70KV.06 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 93 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4.57. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 580 TB 02 dan CB T5.CB70KV.06 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan..... | 94 |
| Gambar 4.58. Respon sudut rotor saat motor M532FN11 <i>starting</i> | 95 |
| Gambar 4.59. Respon frekuensi saat motor M532FN11 <i>starting</i> | 95 |
| Gambar 4.60. Respon tegangan saat motor M532FN11 <i>starting</i> | 96 |



DAFTAR TABEL

| | Halaman |
|--|---------|
| Tabel 2.1. Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (60 Hz) | 21 |
| Tabel 2.2. Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (50 Hz) | 21 |
| Tabel 2.3. Skema Pelepasan Beban Enam Langkah (60 Hz) | 21 |
| Tabel 2.4. Skema Pelepasan Beban Enam Langkah (50 Hz) | 22 |
| Tabel 3.1. Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan Permintaan | 24 |
| Tabel 3.2. Data Kapasitas Pembangkit di PT.SEMEN TONASA | 25 |
| Tabel 3.3. Data Kapasitas Pembangkit di PT.SEMEN TONASA | 25 |
| Tabel 3.4. Data Reaktansi Generator PT.SEMEN TONASA | 26 |
| Tabel 3.5. Data Transformator PT. SEMEN TONASA (2-Winding) ... | 26 |
| Tabel 3.6. Data Transformator PT.SEMEN TONASA (3-Winding) | 29 |
| Tabel 3.7. Data Bus PT.SEMEN TONASA..... | 28 |
| Tabel 3.8. Data Bus Generator PT.SEMEN TONASA..... | 39 |
| Tabel 3.9. Data Reaktansi Generator PT.SEMEN TONASA | 40 |
| Tabel 3.10. <i>Time Constant</i> Generator PT. SEMEN TONASA | 40 |
| Tabel 3.11. Parameter <i>exciter</i> tipe ST1 | 41 |
| Tabel 3.12. Parameter governor tipe 505 | 42 |
| Tabel 3.13. Parameter <i>governor</i> tipe 2301 | 44 |
| Tabel 4.1. Total pembangkitan dan beban di PT. SEMEN TONASA .. | 47 |
| Tabel 4.2. Studi kasus kestabilan transien..... | 48 |
| Tabel 4.3. Tabel rekapitulasi kuantitas beban untuk <i>load shedding</i> kasus Gen Out 1 LS | 57 |
| Tabel 4.4. Tabel rekapitulasi kuantitas beban untuk <i>load shedding</i> kasus Gen Out 2 LS | 68 |
| Tabel 4.5. Tabel rekapitulasi kuantitas beban untuk <i>load shedding</i> kasus SC 11 KC LS | 87 |



Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah

Listrik Merupakan hal yang penting bagi kehidupan saat ini. Bahkan dengan listrik manusia dapat mencapai era globalisasi seperti sekarang. Pentingnya listrik bagi semua masyarakat didasarkan pada penggunaan listrik setiap hari. Namun demikian kebutuhan listrik juga mutlak diperlukan oleh dunia industry, hal ini untuk menunjang kinerja dari system produksi yang ada. Sistem kelistrikan yang baik adalah yang dapat memberikan kontinuitas penyaluran daya ke beban secara efektif dan efisien. Kedua hal tersebut sangat bergantung pada keseimbangan antara daya mekanik dengan daya elektrik system kelistrikan di suatu industry.

Berbagai masalah yang terjadi pada industry yang berkaitan dengan keseimbangan haruslah dicegah agar system kelistrikan menjadi tetap dalam keadaan normal. Keseimbangan tersebut dapat mengacu pada beberapa hal, diantaranya adalah tersedianya pembangkitan yang cukup, Namun hal ini belum cukup sebagai tolak ukur kehandalan suatu system. Hal lain yang juga harus ditentukan adalah apakah kondisi transient jika terjadi gangguan akan mengganggu operasi normal sistem atau tidak. Hal ini akan berhubungan dengan kualitas listrik dari pembangkit sampai ke beban yang ada di industry. Kestabilan transien mengacu pada dua hal penting yaitu berupa kestabilan frekuensi dan tegangan. Sistem tenaga listrik yang baik adalah sistem tenaga yang dapat melayani beban secara kontinyu baik tegangan maupun frekuensi yang konstan. Fluktuasi tegangan dan frekuensi yang terjadi harus berada pada batas toleransi yang diizinkan agar peralatan listrik pada sisi beban dapat bekerja dengan baik dan aman. Hal-hal yang menyebabkan adanya ketidakstabilan suatu system kelistrikan adalah adanya pelepasan/penambahan beban secara mendadak, Penambahan kapasitor bank, hubung singkat dan adanya pengaruh *switching recloser*. Akibat adanya perubahan kondisi kerja dari sistem ini, maka keadaan sistem akan berubah dari keadaan lama ke keadaan baru. Periode singkat di antara kedua keadaan tersebut disebut periode peralihan atau transient. Oleh karena itu diperlukan suatu analisis sistem tenaga listrik untuk menentukan apakah sistem tersebut stabil atau tidak, jika terjadi gangguan. Maka dari itu dalam

perencanaan tugas akhir ini akan dibuat suatu perancangan pelepasan beban agar kondisi sistem kelistrikan tetap dalam kondisi seimbang, sehingga menjadikan sistem kelistrikan pada PT SEMEN TONASA tetap dalam keadaan stabil. Penyesuaian oleh pembangkit akan dilakukan melalui governor dari penggerak mula dan eksitasi generator. Stabilitas transient didasarkan pada kondisi kestabilan ayunan pertama (first swing) dengan periode waktu penyelidikan pada detik pertama terjadi gangguan.

Banyak metode yang dapat digunakan untuk menentukan kestabilan suatu sistem tenaga listrik apabila mengalami gangguan, salah satu metode yang dapat digunakan adalah dinamika rotor dan ayunan. Metode ini merupakan persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak yang didasarkan pada prinsip dasar dinamika. Dimana prinsip tersebut menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya.

Selain itu dalam pengerjaan tugas akhir ini nantinya digunakan alat bantu yang untuk menganalisa system kestabilan transien. Alat bantu tersebut adalah menggunakan computer sebagai media simulasi dengan software ETAP. Diharapkan dengan hasil simulasi tersebut nantinya dapat dilakukan beberapa analisa terkait dengan data yang akan didapatkan dan dilakukan dengan melakukan perhitungan-perhitungan terkait kestabilan transien.

1.2. Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pola operasi pada sistem kelistrikan di PT. SEMEN TONASA
2. Bagaimana respon frekuensi dan tegangan serta sudut rotor di PT. SEMEN TONASA saat dilakukan analisis kestabilan transien
3. Bagaimana merancang skema *load shedding* yang handal pada PT. SEMEN TONASA

1.3. Tujuan

Pada tugas akhir ini bertujuan sebagai berikut :

1. Melaksanakan studi kestabilan transien sistem kelistrikan PT.SEMEN TONASA untuk mendapatkan rekomendasi yang diperlukan agar dapat menjaga keandalan serta kestabilan dari

sistem sehingga mampu mengatasi setiap gangguan-gangguan yang terjadi.

2. Merancang suatu skema yang handal agar sistem kelistrikan pada P.T. SEMEN TONASA dapat kembali stabil ketika terjadi gangguan yang dapat menyebabkan sistem tidak stabil.

1.4. Metodologi

Metode penelitian yang digunakan pada tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data
Pengumpulan data-data sistem kelistrikan dan single line diagram dari PT. SEMEN TONASA yang meliputi : data generator dan unit pendukungnya (eksiter dan governor), data jaringan menengah, data transformator, data motor-motor listrik dan skema operasi yang ada.
2. Pemodelan Sistem
Setelah semua data yang diperlukan untuk analisis transien didapatkan, maka dilakukan pemodelan sistem dalam bentuk single line diagram dan sekaligus memasukkan data yang diperoleh pada single line diagram agar dapat dilakukan analisis *power flow* dan transien.
3. Simulasi dan analisis *loadflow*
Analisis *loadflow* dilakukan untuk mengetahui aliran daya pada sistem dan menganalisis skema operasi yang digunakan. Dengan mengetahui aliran daya pada sistem ini nantinya dapat menjadi acuan untuk menentukan studi kasus transien yang akan dilakukan dengan mempertimbangkan kategori pembebanan pada sistem (jumlah daya yang disuplai pada beban). Selain itu dapat digunakan untuk acuan dalam pelepasan beban yakni menentukan kuantum beban yang dilepas saat terjadi gangguan transien agar sistem kembali stabil.
4. Simulasi Transien
Setelah menentukan studi kasus untuk analisis transien maka dilakukan simulasi sistem saat mengalami gangguan transien. Gangguan transien yang disimulasikan ada tiga yakni generator outage, motor starting, dan gangguan hubung singkat.
 - Pada simulasi generator outage dan gangguan hubung singkat yang diamati adalah respon pada bus

di bawah generator dan bus terjauh dari sistem pada tegangan rendah.

- Pada simulasi motor starting yang diamati adalah respon pada bus di bawah generator, bus yang terhubung pada motor dan bus terjauh dari sistem pada tegangan rendah.

5. Analisis Transien

Dari hasil simulasi transien akan dianalisis respon frekuensi, tegangan dan sudut rotor akibat gangguan transien. Perubahan dari respon tegangan, frekuensi dan sudut rotor juga akan diamati dalam selang waktu yang ditentukan, apakah sistem kembali stabil atau tidak berdasarkan standar yang dijadikan acuan. Apabila sistem tidak stabil akan dilakukan load shedding (pelepasan beban) sesuai dengan skema pelepasan beban yang dirancang.

6. Penarikan Kesimpulan

Memberikan kesimpulan mengenai kondisi kestabilan sistem akibat gangguan transien di P T. SEMEN TONASA serta memberikan rekomendasi untuk mengatasi gangguan tersebut seperti perlu tidaknya dilakukan load shedding.

1.5. Sistematika

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

Bab I : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika, dan relevansi atau manfaat.

Bab II : Dasar Teori

Bab ini secara umum membahas stabilitas transient dan konsep pelepasan beban.

Bab III : Sistem Kelistrikan PT. SEMEN TONASA dan Setup Simulasi.

Bab ini membahas sistem kelistrikan industri dan spesifikasi beban pada PT. SEMEN TONASA

BAB IV : Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas data hasil simulasi stabilitas transien pada generator serta bus akibat gangguan generator outage, motor trip, efek motor starting dan hubung singkat. Dari hasil simulasi stabilitas transien diperhatikan respon sudut rotor

generator, respon frekuensi bus dan respon tegangan sebelum, saat dan setelah terjadi gangguan.

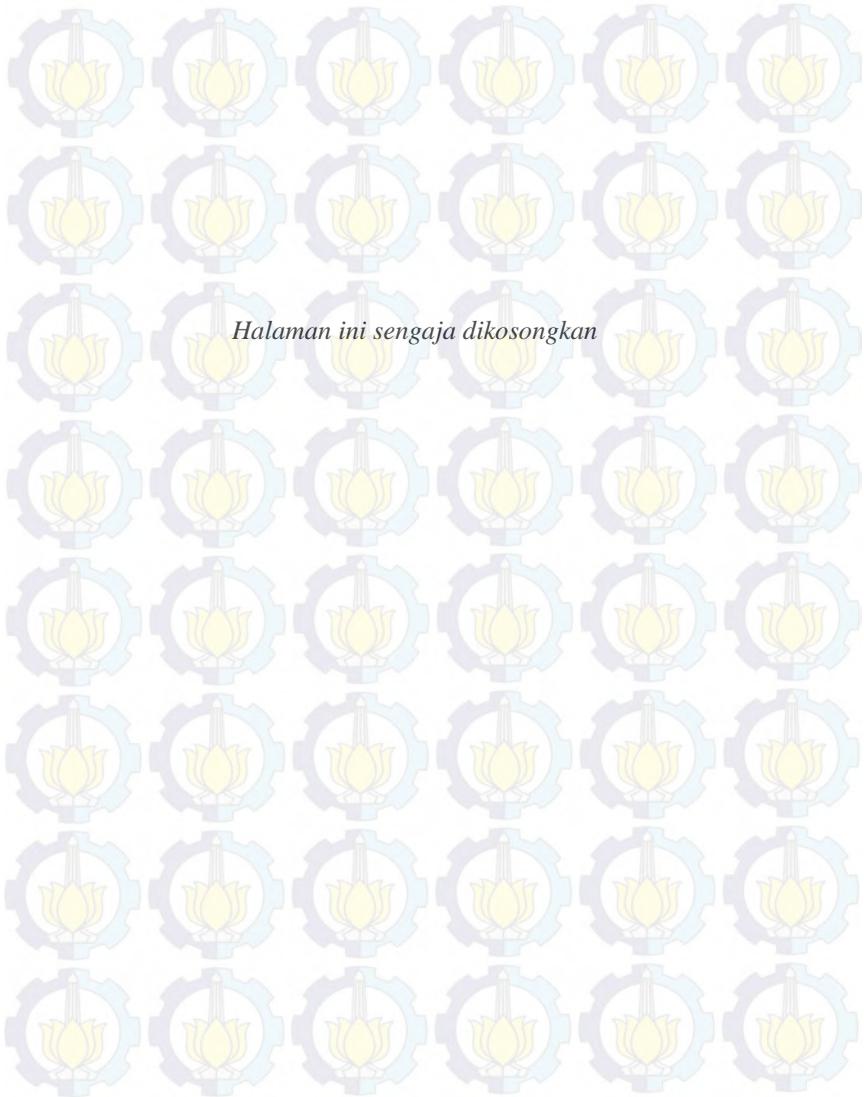
BAB V : Penutup

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

1.6. Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat digunakan untuk menentukan mode operasi yang stabil dan aman pada sistem kelistrikan PT. SEMEN TONASA
2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk melakukan load shedding terhadap sistem kelistrikan PT. SEMEN TONASA
3. Dapat dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya tentang stabilitas transien pada sistem kelistrikan industri.



BAB 2

KESTABILAN TRANSIEN

2.1. Kestabilan Sistem Tenaga [1]

Kestabilan sistem tenaga listrik secara luas dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari satu sistem tenaga listrik untuk tetap berada pada kondisi setimbang dalam kondisi operasi normal dan dapat memperoleh kembali kondisi seimbang setelah sistem mengalami gangguan.

Ketidakstabilan dalam sistem tenaga dapat disebabkan oleh banyak hal bergantung pada konfigurasi sistem dan pola operasi yang digunakan. Secara mendasar masalah kestabilan salah satunya adalah menjaga operasi sinkron antar generator yang terinterkoneksi. Karena sistem tenaga bergantung pada mesin sinkron untuk pembangkitan dayanya, maka untuk operasi sistem yang baik diperlukan semua generator tetap dalam kondisi sinkron. Kestabilan generator ini dipengaruhi oleh perubahan dari sudut daya generator.

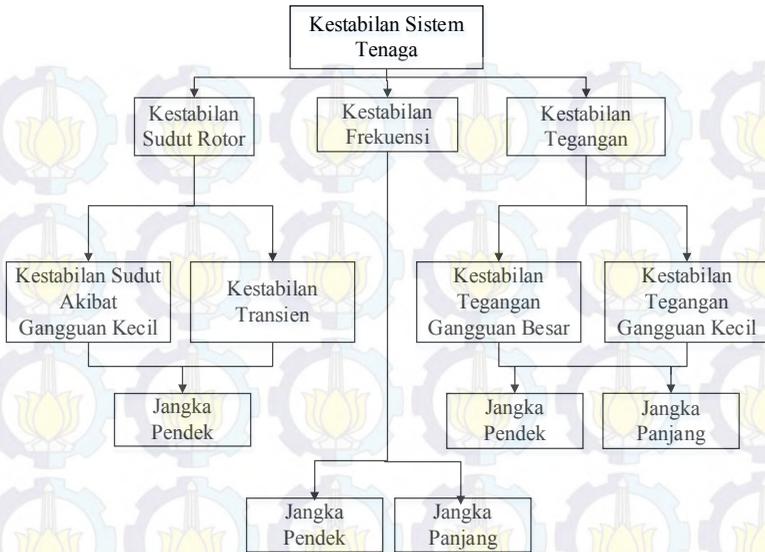
Ketidakstabilan juga dapat terjadi tanpa hilangnya sinkronisasi. Sebagai contoh ketika *starting* motor induksi dimana akan terjadi drop tegangan yang besar sehingga sistem tidak stabil. Dalam hal ini yang menjadi sorotan adalah kestabilan dan pengaturan tegangan.

Dalam evaluasi kestabilan memperhatikan ketika sistem mengalami gangguan. Gangguan ini dapat berupa gangguan besar dan gangguan kecil. Gangguan kecil berupa perubahan beban yang berlangsung terus menerus. Gangguan besar seperti lepasnya generator, terjadinya hubung singkat.

Begitu banyak faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, untuk mempermudah dalam menganalisa kestabilan, maka perlu sebuah pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga listrik. Berdasarkan Paper IEEE *definition and classification of power system stability*, kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori yaitu [2]:

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan

Pengklasifikasian sistem tenaga secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik [2]

2.1.1. Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari beberapa mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkron [1]. Kestabilan ini bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan dan memperoleh kembali kesetimbangan antara torsi mekanik dan torsi elektrik dari masing-masing mesin sinkron pada sistem. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi adalah dalam bentuk peningkatan sudut ayunan dari beberapa generator yang menyebabkan hilangnya sinkronisasi dengan generator yang lainnya.

2.1.1.1. Hubungan antara sudut rotor dan daya [1]

Salah satu karakteristik yang penting dalam kestabilan sistem tenaga listrik adalah hubungan antara perubahan daya dan posisi rotor pada mesin sinkron. Hubungan sudut rotor dan daya ini sangat tidak linear. Ilustrasi dari hubungan ini dapat dilihat pada gambar 2.2 dan 2.3.

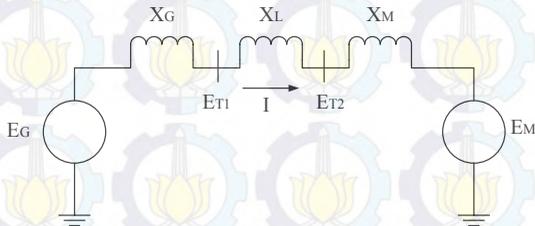


Gambar 2.2. Diagram impedansi sistem dua mesin [1]

Gambar 2.2. terdiri dari dua mesin sinkron yang terhubung melalui sebuah saluran transmisi yang memiliki nilai reaktansi namun nilai resistansi dan kapasitansi diabaikan. Diasumsikan bahwa mesin 1 merupakan generator yang mensuplai daya ke motor yaitu mesin 2.

Daya yang disalurkan dari generator ke motor merupakan fungsi perbedaan sudut (δ) antara dua mesin tersebut. Perbedaan sudut ini diakibatkan oleh tiga komponen, yaitu :

1. Sudut internal generator δ_G , sudut dimana rotor dari generator mendahului medan putar pada stator.
2. Perbedaan sudut antara tegangan terminal generator dan motor, sudut δ_L dimana tegangan terminal generator mendahului tegangan motor.
3. Sudut internal motor δ_M , sudut dimana rotor tertinggal oleh medan putar stator pada motor.



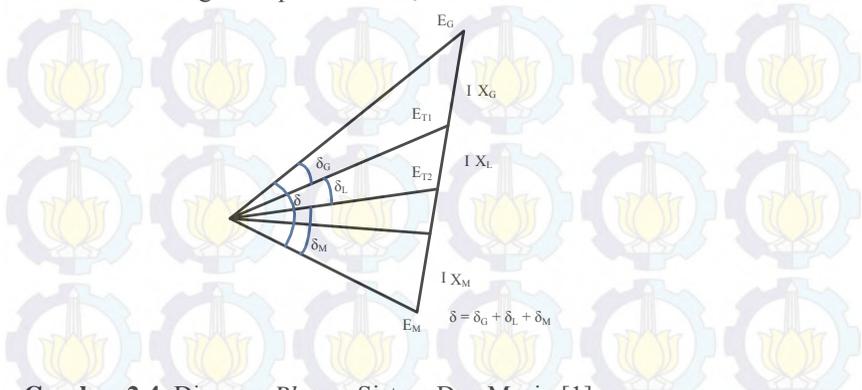
Gambar 2.3. Model ideal sistem dua mesin [1]

Gambar 2.3 menunjukkan sebuah model dari sistem yang dapat digunakan untuk menghitung hubungan antara daya terhadap sudut, dimana:

- E_G = Tegangan internal generator (p.u)
- E_M = Tegangan internal motor (p.u)
- X_G = Reaktansi internal generator (p.u)
- X_M = Reaktansi internal motor (p.u)
- X_L = Reaktansi saluran (p.u)

Pada Gambar 2.4. akan ditunjukkan diagram fasor hubungan antara

tegangan internal motor E_M dengan tegangan internal generator E_G berdasarkan ketiga komponen diatas,



Gambar 2.4. Diagram *Phasor* Sistem Dua Mesin [1]

Dari Gambar *phasor* di atas dapat diperoleh suatu persamaan yang menyatakan hubungan daya generator yang ditransfer ke motor dalam fungsi sudut:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.1)$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad (2.2)$$

2.1.1.2. Fenomena Kestabilan [1]

Pada saat sistem dalam kondisi *steady state* terdapat kesetimbangan antara torsi elektrik dan torsi mekanik dari masing-masing generator dan kecepatan tetap konstan. Jika sistem mengalami gangguan, titik kesetimbangan ini akan berubah dan mengakibatkan percepatan atau perlambatan sudut rotor. Ketika salah satu generator berputar lebih cepat dari generator yang lain, posisi sudut rotor relatif terhadap generator yang lebih lambat akan meningkat. Perbedaan sudut yang dihasilkan antara mesin yang lebih lambat dengan mesin yang lebih cepat bergantung pada hubungan daya dan sudut rotor.

Kestabilan sudut rotor secara umum dibedakan menjadi dua bagian, yaitu:

- Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron akibat gangguan kecil. Kestabilan akibat gangguan kecil ini bergantung pada kondisi inisial operasi dari sistem. Ketidakstabilan mungkin terjadi dalam dua bentuk yaitu peningkatan sudut rotor dengan mode periodik karena kurangnya torsi sinkron atau peningkatan osilasi rotor karena kurangnya torsi damping.

- Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar atau gangguan transien

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron akibat gangguan besar seperti gangguan hubung singkat. Respon sistem akibat gangguan besar ini melibatkan besarnya penyimpangan sudut rotor generator dan dipengaruhi juga oleh ketidaklinearan hubungan sudut daya.

Kestabilan transien bergantung pada kondisi inisial dari sistem dan juga bergantung pada besarnya gangguan yang terjadi. Untuk kestabilan transien biasanya diamati dalam kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan, atau juga bisa 10-20 detik setelah gangguan jika sistemnya sangat besar.

2.1.2. Kestabilan Tegangan [2]

Kestabilan tegangan dapat diartikan sebagai kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan nilai tegangannya di semua bus pada sistem dalam kondisi operasi normal maupun setelah terjadi gangguan. Kestabilan tegangan bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan dan memperoleh kembali kestabilan antara permintaan beban dan suplai daya dari sistem. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi adalah terjadinya peningkatan atau jatuhnya nilai tegangan pada beberapa bus pada sistem. Faktor utama yang menjadi penyebab ketidakstabilan tegangan adalah ketidakmampuan dari sistem untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif beban.

Penurunan tegangan bus dapat juga dihubungkan dengan ketidakstabilan sudut rotor. Contohnya, ketika terjadi *loss of synchronism* di antara dua grup mesin akan mengakibatkan tegangan yang sangat rendah di tengah saluran sistem.

Kestabilan tegangan dikelompokkan menjadi dua macam, berdasarkan gangguannya:

- Kestabilan tegangan akibat gangguan besar

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mempertahankan kestabilan tegangan akibat gangguan besar seperti lepasnya pembangkit dan gangguan hubung singkat. Kemampuan sistem ini ditentukan oleh karakteristik sistem dan beban serta proteksi yang ada.

- Kestabilan tegangan akibat gangguan kecil

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mempertahankan kestabilan tegangan akibat gangguan kecil seperti perubahan beban.

2.1.3. Kestabilan Frekuensi [2]

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan dari sistem untuk mempertahankan kestabilan frekuensi akibat gangguan pada sistem yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Ketidakstabilan yang mungkin terjadi berupa ayunan frekuensi yang dapat mengakibatkan putusnya unit pembangkit atau beban.

Pada umumnya masalah kestabilan frekuensi dikaitkan dengan ketidakmampuan dari respons peralatan, koordinasi yang jelek pada peralatan kontrol dan peralatan proteksi, atau kurangnya daya cadangan pembangkitan.

Selama terjadinya penyimpangan frekuensi, besarnya tegangan mungkin dapat berubah dengan signifikan, terutama untuk kondisi *islanding* yang menggunakan *underfrequency load shedding* untuk melepas bebannya. Perubahan nilai tegangan yang mungkin persentasenya lebih besar dari perubahan frekuensi dapat mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban.

2.2. Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron ketika sistem mengalami gangguan transien [1]. Gangguan transien ini berupa gangguan besar yang terjadi pada sistem seperti gangguan hubung singkat, lepasnya pembangkit, *motor starting* serta penambahan beban secara tiba-tiba.

2.2.1. Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat merupakan gangguan yang paling terjadi dalam satu sistem tenaga listrik. Gangguan hubung singkat ini dapat disebabkan adanya sambaran petir, kegagalan isolasi, gangguan binatang dan ranting pohon. Saat terjadi hubung singkat, arus yang

mengalir menuju titik gangguan bernilai sangat besar sehingga tegangan di sekitar titik gangguan akan menurun secara signifikan. Semakin besar arus hubung singkat maka semakin rendah tegangan di sekitar titik gangguan. Hal ini akan mengakibatkan kestabilan sistem menjadi terganggu. Selain itu dapat merusak peralatan karena nilai arus yang sangat besar.

2.2.2. Motor Starting

Pada saat motor di *start*, ada arus yang sangat tinggi yang besarnya berkali-kali dari arus nominal. Arus ini disebut dengan *locked rotor current* (LRC) yang nilainya bervariasi pada tiap motor. Arus *starting* yang sangat besar ini akan mengakibatkan drop tegangan pada sistem. Hal ini dikarenakan arus yang besar ini melewati impedansi saluran, trafo sehingga drop tegangan pada saluran semakin besar. Selain itu arus *starting* yang besar juga akan mengakibatkan rugi-rugi daya aktif pada saluran bertambah besar sehingga dapat menurunkan frekuensi generator. Drop tegangan dan turunnya frekuensi ini dapat mengakibatkan kestabilan sistem menjadi terganggu.

2.2.3. Penambahan Beban secara Tiba-Tiba [3]

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

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

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

pembebanan tersebut, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar.

2.3. Persamaan Ayunan Generator [4]

Persamaan pengaturan gerakan rotor satu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa torsi percepatan adalah hasil perkalian dari momen inersia dan percepatan sudut. Dalam sistem MKS (meter-kilogram-second) persamaannya dapat dituliskan seperti :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.3)$$

Dimana,

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

T_m merupakan torsi mekanik dari rotor generator yang sifatnya cenderung mempercepat putaran rotor. Pada kondisi stabil (*steady state*), besar torsi mekanik (T_m) sama dengan besar torsi listrik (T_e) sehingga tidak ada momen percepatan (*accelerating torque*). Dalam kondisi ini dapat dikatakan bahwa tidak terdapat percepatan maupun perlambatan pada rotor generator. Namun, pada kondisi yang tidak stabil akibat gangguan dapat menyebabkan adanya perbedaan antara besar torsi mekanik dan torsi listrik. Sehingga, dapat menyebabkan adanya percepatan ataupun perlambatan pada rotor generator.

Pada persamaan (2.3) karena θ_m diukur terhadap sumbu yang diam, maka untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron adalah seperti persamaan berikut:

$$\theta_m = \omega_m t + \delta_m \quad (2.4)$$

dengan δ adalah pergeseran sudut rotor dalam radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron. Penurunan persamaan (2.4) terhadap waktu menghasilkan kecepatan putaran rotor seperti persamaan berikut:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.5)$$

dan percepatan rotor diperoleh dengan menurunkan persamaan 2.5 terhadap waktu :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.6)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.6) ke dalam (2.3), diperoleh persamaan :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.7)$$

Dengan mengalikan ω_m dengan persamaan (2.7) akan didapatkan persamaan :

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.8)$$

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.9)$$

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.10)$$

Pada data mesin yang digunakan untuk analisa kestabilan sistem, sering ditemui konstanta yang berhubungan dengan momen inersia yang disimbolkan dengan H, secara matematika dirumuskan:

$$H = \frac{\text{Energi kinetik dalam MJ pada kecepatan sinkron}}{\text{rating mesin dalam MVA}} \quad (2.11)$$

$$H = \frac{1/2 M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad (2.12)$$

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \quad (2.12)$$

Dengan memasukkan persamaan (2.12) ke dalam persamaan (2.10), didapatkan persamaan :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} S_{mach} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.13)$$

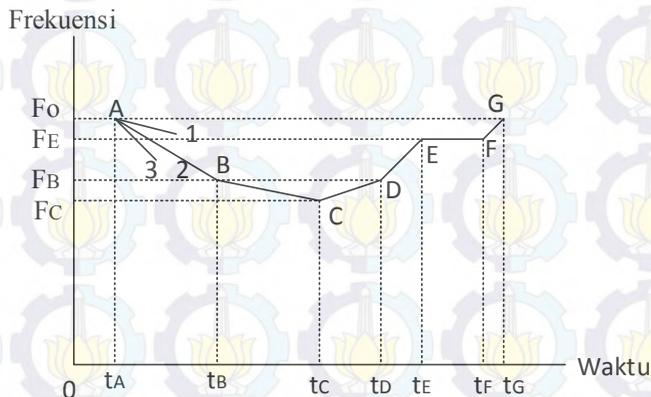
Kemudian dengan membagi persamaan 2.13 dengan S_{mach} diperoleh :

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_m}{S_{mach}} - \frac{P_e}{S_{mach}}$$

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{per unit} \quad (2.14)$$

2.4. Sistem Pengoperasian *Load Shedding*[5]

Jika terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan besarnya suplai daya yang dihasilkan oleh pembangkit tidak mencukupi kebutuhan beban misalnya karena adanya pembangkit yang lepas (trip), maka untuk mencegah terjadinya ketidakstabilan sistem perlu dilakukan pelepasan beban (*load shedding*). Keadaan yang kritis pada sistem dapat dideteksi melalui frekuensi sistem yang menurun dengan cepat. Hal ini diilustrasikan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban [5]

Pada saat $t=t_A$, ada unit pembangkit yang lepas sehingga frekuensi menurun dengan tajam. Penurunan frekuensi sistem ini bisa melalui garis 1, garis 2 atau garis 3 bergantung pada besarnya kapasitas pembangkit yang lepas dibandingkan dengan kebutuhan beban yang ada. Semakin besar daya yang yang hilang maka akan semakin cepat frekuensi menurun. Kecepatan menurunnya frekuensi sistem juga

bergantung pada inersia sistem. Semakin besar nilai inersia, makin kokoh sistemnya dan makin lambat turunnya frekuensi.

Pada gambar 2.5 dimisalkan frekuensi sistem menurun mengikuti garis 2. Setelah mencapai titik B dilakukan pelepasan beban tahap pertama oleh *Under Frequency Relay* (UFR) yang bekerja setelah mendeteksi turunnya frekuensi sistem mencapai f_r . Setelah dilakukan pelepasan beban tahap pertama, kecepatan turunnya frekuensi berkurang. Namun karena kurangnya suplai daya frekuensi sistem masih menurun hingga titik C, sehingga dilakukan pelepasan beban tahap kedua setelah UFR mendeteksi turunnya frekuensi hingga f_c .

Setelah dilakukan pelepasan beban tahap kedua, sistem mulai kembali stabil ditunjukkan dengan tidak menurunnya frekuensi sistem. Frekuensi sistem naik hingga titik D dikarenakan telah dilakukan pelepasan beban tahap kedua besarnya suplai daya lebih besar daripada total beban. Dimulai dari titik D, governor pembangkit mulai bekerja melakukan pengaturan primer yaitu selama t_D .

Waktu sebelum bekerjanya governor ini (t_D) berkisar selama 4 detik. Periode sebelum governor melakukan pengaturan primer disebut periode transien dan berlangsung selama kira-kira 4 detik. Setelah governor melakukan pengaturan primer maka frekuensi sistem naik hingga mencapai f_E . Kemampuan governor melakukan pengaturan primer bergantung pada besarnya *spinning reserve* yang masih tersedia dalam sistem. Setelah mencapai titik E masih ada penyimpangan frekuensi sebesar F dari frekuensi sistem yang diinginkan yaitu f_0 dan penyimpangan ini dikoreksi dengan pengaturan sekunder oleh governor yang dimulai pada titik F dan akhirnya frekuensi sistem kembali stabil pada titik G.

Apabila unit pembangkit yang lepas tidak begitu besar mungkin penurunan frekuensi tidak mencapai titik C sehingga dengan pelepasan beban tahap pertama saja sudah cukup untuk mengembalikan sistem menjadi stabil. Dalam prakteknya, pelepasan beban dilakukan dengan memasang UFR (*Under Frequency Relay*) pada berbagai *feeder* distribusi yang dipilih menurut kondisi setempat. Jumlah UFR harus sedikitnya cukup untuk melepas beban sebesar unit terbesar dalam sistem.

Penurunan frekuensi bisa terjadi pada saat lepasnya pembangkit. Selama kurun waktu 2 detik yaitu periode ketika governor belum bekerja, frekuensi menurun dengan cepat dan mencapai tingkatan yang minimum.

Kemudian governor bekerja sehingga frekuensi kembali pas kondisi stabil yang lebih rendah dari frekuensi normalnya. Frekuensi ini disebut frekuensi residu. Skema pelepasan yang tepat harus menentukan frekuensi minimum dan frekuensi residu.

Pelepasan beban dapat dilakukan dengan dua cara yaitu :

1. Pelepasan beban secara manual (*Manual Load Shedding*)
2. Pelepasan beban secara otomatis (*Automatic Load Shedding*)

2.4.1. Pelepasan Beban Secara Manual

Pelepasan beban secara manual hanya dapat dipakai dalam keadaan yang tidak begitu penting, seperti perkembangan beban yang melebihi kapasitas pembangkit atau turunnya tegangan di dalam daerah tertentu yang disebabkan oleh gangguan. Dalam keadaan darurat karen turunnya tegangan hingga 80%, operator akan mengambil inisiatif sendiri untuk melakukan pelepasan beban.

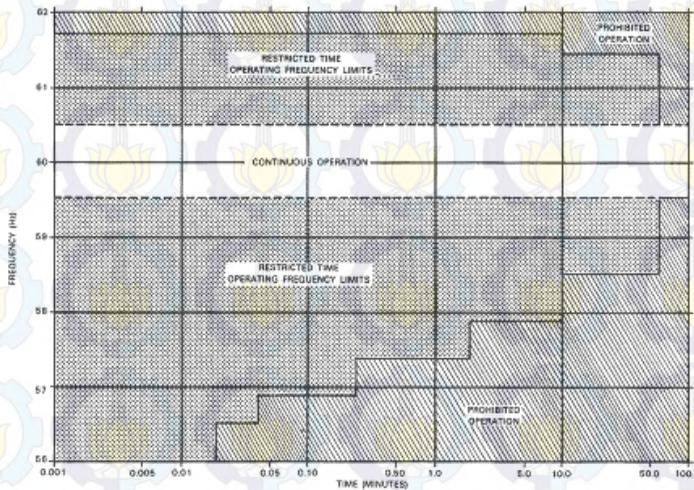
Kekurangan dari pelepasan beban secara manual ialah kebutuhan akan operator yang siap dan handal karena keterlambatan operator dalam mengatasi permasalahan ini akan berakibat fatal pada stabilitas sistem.

2.4.2. Pelepasan Beban Secara Otomatis

Dalam perencanaan pelepasan beban secara otomatis memerlukan pemasangan alat yang tepat dan dapat melindungi sistem dengan cepat apabila terjadi penurunan frekuensi yang besar dalam waktu yang sangat singkat. Alat tersebut adalah UFR (*Under Frequency Relay*). Rele ini digunakan untuk mendeteksi frekuensi pada satu batas tertentu.

2.5. Standar yang Digunakan untuk Analisis Kestabilan Transien

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



Gambar 2.6. Batas Operasi Frekuensi Abnormal untuk *Steam Turbin Generator* [6]

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

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

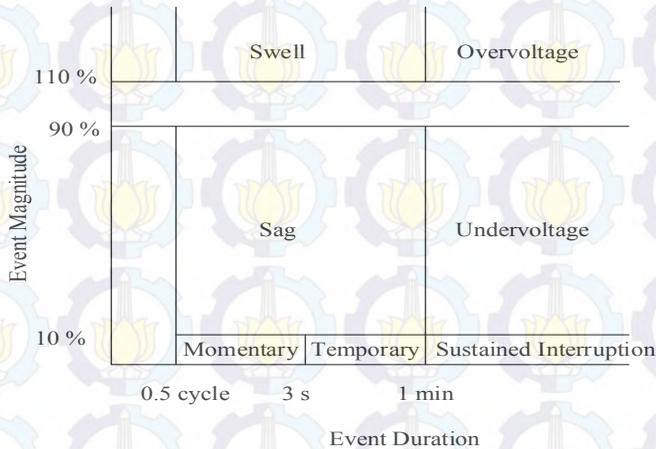
2.5.2. Standar Tegangan [7]

Standar yang digunakan untuk tegangan nominal dalam kondisi normal adalah berdasarkan standar PLN, yaitu :

- 500 kV +5%, -5%

- 150 kV +5%, -10%
- 70 kV +5%, -10%
- kV +5%, -10%

Sedangkan standar yang digunakan untuk kedip tegangan adalah *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* (IEEE Std 1159-1995).



Gambar 2.7. Definisi *Voltage Magnitude Event* berdasarkan standar IEEE 1159-195 [7]

Gambar 2.7. menunjukkan bahwa untuk kedip tegangan batas nilai yang diperbolehkan adalah 10% untuk *momentary* selama 3 detik senagkan untuk *temporary* selama 1 menit.

2.5.3. Standar Pelepasan Beban [8]

Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 terdapat dua skema pelepasan beban yaitu skema pelepasan beban dengan 3 langkah dan 6 langkah

Tabel 2.1.Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (60Hz)

| Langkah | Titik Pemberhentian Frekuensi (Hz) | Jumlah Pelepasan Beban (%) | Waktu <i>delay</i> pada relay (Cycles) |
|---------|------------------------------------|--|--|
| 1 | 59.3 | 10 | 6 |
| 2 | 58.9 | 15 | 6 |
| 3 | 58.5 | Disarankan untuk menangkap penurunan sebelum 58,2 Hz | |

Tabel 2.2.Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (50Hz)

| Langkah | Titik Pemberhentian Frekuensi (Hz) | Jumlah Pelepasan Beban (%) | Waktu <i>delay</i> pada relay (Cycles) |
|---------|------------------------------------|--|--|
| 1 | 49.41 | 10 | 6 |
| 2 | 49.08 | 15 | 6 |
| 3 | 48.75 | Disarankan untuk menangkap penurunan sebelum 58,2 Hz | |

Tabel 2.3.Skema Pelepasan Beban Enam Langkah (60Hz)

| Langkah | Titik Pemberhentian Frekuensi (Hz) | Jumlah Pelepasan Beban (%) | Waktu <i>delay</i> pada relay (Cycles) |
|---------|------------------------------------|----------------------------|--|
| 1 | 59,5 | 10 | 6 |
| 2 | 59,2 | 10 | 6 |
| 3 | 58,8 | 5 | 6 |
| 4 | 58,8 | 5 | 14 |
| 5 | 58,4 | 5 | 14 |
| 6 | 58,4 | 5 | 21 |

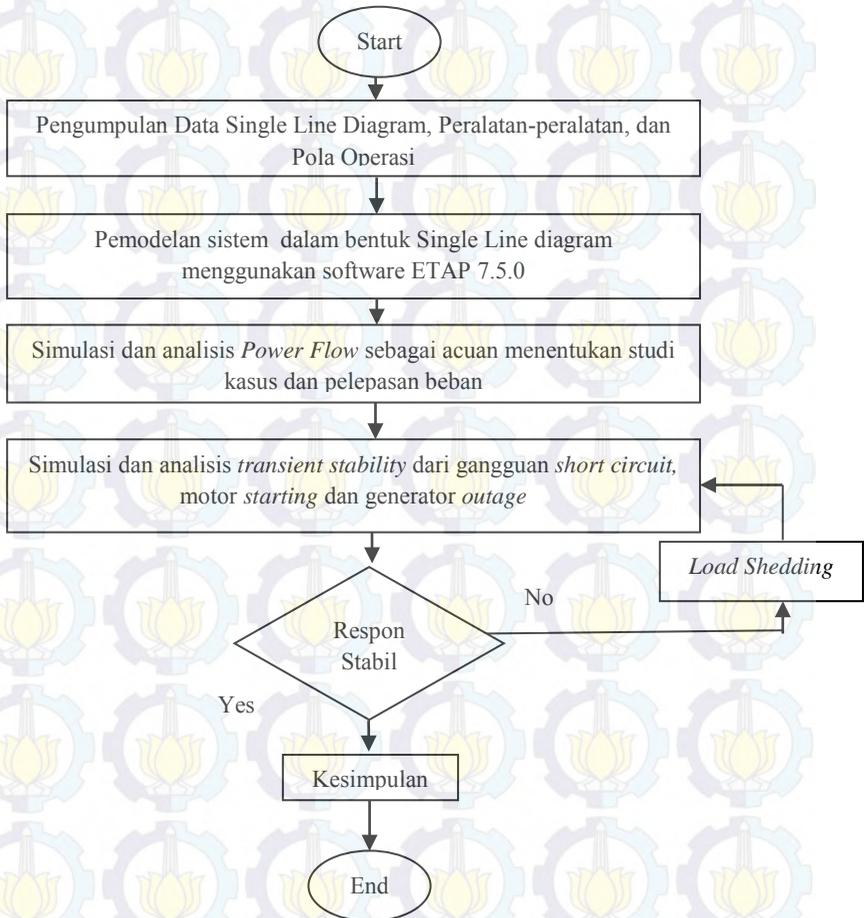
Tabel 2.4.Skema Pelepasan Beban Enam Langkah (50Hz)

| Langkah | Titik Pemberhentian Frekuensi (Hz) | Jumlah Pelepasan Beban (%) | Waktu <i>delay</i> pada relay (Cycles) |
|---------|------------------------------------|----------------------------|--|
| 1 | 49,7 | 10 | 6 |
| 2 | 49,4 | 10 | 6 |
| 3 | 49 | 5 | 6 |
| 4 | 49 | 5 | 14 |
| 5 | 48,6 | 5 | 14 |
| 6 | 48,6 | 5 | 21 |

BAB 3
SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN TONASA

3.1. Metode Pelaksanaan Studi

Metodologi yang digunakan untuk melakukan studi analisis kestabilan transien pada sistem kelistrikan PT. SEMEN TONASA dapat digambarkan dalam *flowchart* pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi

3.2. Sistem Kelistrikan di PT.SEMEN TONASA

PT. SEMEN TONASA merupakan salah satu perusahaan penghasil semen di Indonesia yang terletak di Pangkep, Sulawesi Selatan. PT. SEMEN TONASA memiliki sebuah sistem yang cukup besar. Sistem kelistrikannya juga cukup kompleks. PT.SEMEN TONASA memiliki 4 unit pembangkit dengan kapasitas masing-masing 2x35 MW dan 2x25 MW, Serta terhubung dengan grid PLN 1500 MVaSC. Untuk memenuhi kelangsungan produksinya PT. SEMEN TONASA mendapat pasokan daya dari PLN, empat buah pembangkit berkapasitas 2x35 MW dan 2x25 MW. Tegangan yang digunakan pada sistem ini 70 KV, 22 KV, 11 KV, 6.3 KV dan 0,4 kV. Pembangkit utama di PT. SEMEN TONASA menggunakan empat buah *steam turbine generator* (GTG). Sistem ini begitu besar dan kompleks, sehingga diperlukan peralatan – peralatan yang handal dan berkualitas agar menjamin kontinuitas proses pengolahan di PT.SEMEN TONASA.

3.3. Data Kelistrikan PT.SEMEN TONASA

3.3.1 Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan Permintaan PT.SEMEN TONASA

Tabel 3.1 Jumlah Total Pembangkitan, Pembebanan, dan Permintaan PT. SEMEN TONASA

| Keterangan | MW | Mvar | MVA | % PF |
|------------------------|---------|---------|---------|------------|
| Sources Swing Bus (es) | 41.920 | 13.720 | 44.108 | 95.04 Lag |
| Sources Non-Swing Bus | 71.000 | 21.756 | 74.259 | 95.61 Lag |
| Total Demand | 112.920 | 35.476 | 118.362 | 95.40 Lag |
| Total Motor Load | 87.003 | 66.424 | 109.461 | 79.48 Lag |
| Total Static Load | 22.182 | -7.436 | 23.993 | 95.08 Lead |
| Apparent Losses | 3.106 | -23.512 | | |

3.3.2. Sistem Pembangkitan

Sistem pembangkitan PT. SEMEN TONASA memiliki 4 unit pembangkit untuk menyuplai beban yang besar. Pada PT.SEMEN TONASA (BTG BARU) terdiri dari 2 unit pembangkit yaitu BTGN.GEN01 dan BTGN.GEN02 dengan kapasitas pembangkitan masing-masing 35 MW. Sedangkan pada PT.SEMEN TONASA (BTG LAMA) terdiri dari 2 unit pembangkit yaitu BTGE.GEN01 dan

BTGE.GEN02 dengan kapasitas pembangkitan masing-masing 25 MW. Semua pembangkitan tersebut menyuplai plant BTG LAMA, BTG BARU, Tonasa IV, Tonasa V. Untuk plant Tonasa II&III disuplai oleh grid PLN 1500 MVA yang dioperasikan *swing*. Berikut adalah tabel data kapasitas pembangkit di PT.SEMEN TONASA:

Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit di PT.SEMEN TONASA

| No | ID | MW | MVA | kV | PF (%) |
|----|------------|----|-------|-----|--------|
| 1 | BTGE.GEN02 | 25 | 31.25 | 6.3 | 80 |
| 2 | BTGE.GEN01 | 25 | 31.25 | 6.3 | 80 |
| 3 | BTGN.GEN01 | 35 | 43.75 | 11 | 80 |
| 4 | BTGN.GEN02 | 35 | 43.75 | 11 | 80 |

Dari 4 unit generator yang beroperasi, 3 unit dioperasikan sebagai *voltage control* dan 1 unit dioperasikan sebagai *swing*. *Swing* generator terletak pada generator di BTG BARU dengan ID BTGN.GEN02. Berikut adalah tabel data kapasitas dan reaktansi pembangkit PT.SEMEN TONASA:

Tabel 3.3 Data Kapasitas Pembangkit di PT.SEMEN TONASA

| STG | BTGN.GEN(01-02) | BTGE.GEN(01-02) |
|------------------|-----------------|-----------------|
| Manufaktur | Steam Turbine | Steam Turbine |
| Rating Generator | 35 MW | 25 MW |
| Rating Frekuensi | 50 Hz | 50 Hz |
| Rating Tegangan | 11 kV | 6.3 kV |
| Rating PF | 0,8 | 0,8 |
| FLA Rating | 2296 A | 2864 A |
| Pole | 4 | 2 |
| RPM | 1500 | 3000 |

Tabel 3.4 Data Reaktansi Generator PT.SEMEN TONASA

| Reaktansi | STG | |
|-----------|---------------|---------------|
| | BTGE.GEN01/02 | BTGN.GEN01/02 |
| Xd | 191.4 | 176 |
| Xd' | 19.62 | 28.7 |
| Xd'' | 12.22 | 18.1 |
| X2 | 14.9 | 18.1 |
| X0 | 6.37 | 7.3 |

3.3.3. Sistem Distribusi

Tegangan yang digunakan dalam sistem distribusi PT.SEMEN TONASA terdiri dari lima level tegangan yang berbeda yaitu 70 kV; 22 kV; 11 kV; 6.3 kV ; dan 0,4 kV. Sisi *plant* BTG BARU memiliki 4 transformator yang akan menyalurkan daya menuju level tegangan tinggi dan menengah, 2 transformator yang akan menyalurkan daya menuju tegangan menengah, dan 2 transformator yang akan menyalurkan daya menuju tegangan tinggi. Sedangkan di sisi BTG LAMA hanya memiliki 3 transformator dari tegangan menengah menuju tegangan menengah, 2 transformator yang akan menyalurkan daya menuju tegangan 6,3 KV dan 1 transformator yang akan menyalurkan daya menuju tegangan 22 KV. Beberapa *plant* distribusi PT.SEMEN TONASA di sisi Tonasa 2,3,4,dan 5 disuplai oleh *double feeder* yang dipisahkan oleh *tie* CB dan *single feeder*.

Berikut adalah data transformator dan bus yang terpasang dan digunakan pada *plant* PT.SEMEN TONASA.

Tabel 3.5 Data Transformator PT. SEMEN TONASA (2-Winding)

| No | Transformer ID | Rating | | |
|----|----------------|--------|----------|---------|
| | | MVA | Prim. KV | Sec. KV |
| 1 | BTGE.MAINTRG01 | 40.000 | 70.000 | 6.300 |
| 2 | BTGE.MAINTRG02 | 40.000 | 70.000 | 6.300 |
| 3 | BTGN.MAINTRG01 | 45.000 | 70.000 | 11.000 |
| 4 | BTGN.MAINTRG02 | 45.000 | 70.000 | 11.000 |
| 5 | BTGN.TRG01 | 8.000 | 11.000 | 6.000 |
| 6 | BTGN.TRG02 | 8.000 | 11.000 | 6.000 |
| 7 | DIST.TR22KV.01 | 10.000 | 70.000 | 22.000 |

| No | Transformer ID | Rating | | |
|----|--------------------|--------|----------|--------|
| | | MVA | Prim. KV | Sec.KV |
| 8 | T2-3.TRB.BB1.TR.01 | 0.800 | 6.300 | 0.400 |
| 9 | T2-3.TRB.BB1.TR.02 | 1.600 | 6.000 | 0.400 |
| 10 | T2-3.TRB.BB1.TR.03 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 11 | T2-3.TRB.BB1.TR.04 | 0.630 | 6.000 | 0.400 |
| 12 | T2-3.TRB.BB1.TR.05 | 1.600 | 6.000 | 0.400 |
| 13 | T2-3.TRB.BB2.TR.01 | 1.250 | 6.000 | 0.400 |
| 14 | T2-3.TRB.BB2.TR.02 | 1.600 | 6.000 | 0.400 |
| 15 | T2-3.TRB.BB2.TR.03 | 1.250 | 6.000 | 0.400 |
| 16 | T2-3.TRB.BB2.TR.04 | 1.600 | 6.300 | 0.400 |
| 17 | T2-3.TRB.BB2.TR.06 | 1.600 | 6.000 | 0.400 |
| 18 | T2-3.TRB.BB2.TR.07 | 1.600 | 6.000 | 0.400 |
| 19 | T2-3.TRB.BB2.TR.08 | 0.800 | 6.300 | 0.400 |
| 20 | T2-3.TRB.BB2.TR.09 | 0.400 | 6.000 | 0.400 |
| 21 | T2-3.TRB.BB2.TR.10 | 0.400 | 6.000 | 0.400 |
| 22 | T2-3.TRB.BB2.TR.11 | 0.600 | 6.000 | 0.400 |
| 23 | T2-3.TRL.TR.01 | 1.600 | 6.300 | 0.400 |
| 24 | T2-3.TRL.TR.02 | 1.600 | 6.300 | 0.400 |
| 25 | T2-3.TRL.TR.03 | 1.600 | 6.300 | 0.400 |
| 26 | T4.SS1.SG4.TR.06 | 2.000 | 6.300 | 0.400 |
| 27 | T4.SS2.SG4.TR.01 | 1.600 | 6.000 | 0.400 |
| 28 | T4.SS2.SG4.TR.02 | 1.600 | 6.000 | 0.400 |
| 29 | T4.SS2.SG4.TR.03 | 1.250 | 6.000 | 0.400 |
| 30 | T4.SS2.SG4.TR.04 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 31 | T4.SS2.SG4.TR.05 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 32 | T4.SS2.SG4.TR.07 | 2.000 | 6.300 | 0.400 |
| 33 | T4.SS2.SG4.TRDV.01 | 0.800 | 6.300 | 1.725 |
| 34 | T4.SS2.SG4.TRDV.02 | 0.800 | 6.300 | 1.725 |
| 35 | T4.SS2.SG4.TRDV.03 | 2.500 | 6.300 | 1.725 |
| 36 | T4.SS2.SG4.TRDV.04 | 2.500 | 6.300 | 1.725 |
| 37 | T4.SS3.SG6.TR.01 | 1.600 | 6.300 | 0.400 |
| 38 | T4.SS3.SG6.TR.02 | 1.600 | 6.300 | 0.400 |
| 39 | T4.SS3.SG7.TR.01 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 40 | T4.SS3.SG7.TR.02 | 1.250 | 6.300 | 0.400 |
| 41 | T5.ER51.TR | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 42 | T5.ER52.TR | 2.500 | 6.300 | 0.400 |

| No | Transformer ID | Rating | | |
|----|------------------|--------|----------|--------|
| | | MVA | Prim. KV | Sec.KV |
| 43 | T5.ER53.TR.01 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 44 | T5.ER53.TR.02 | 0.350 | 6.300 | 0.400 |
| 45 | T5.ER54.TR.01 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 46 | T5.ER54.TR.02 | 2.000 | 6.300 | 0.400 |
| 47 | T5.ER54.TRDV | 0.950 | 6.300 | 0.400 |
| 48 | T5.ER55.TR.01 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 49 | T5.ER55.TR.02 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 50 | T5.ER55.TR.03 | 2.000 | 6.300 | 0.400 |
| 51 | T5.ER55.TRDV.01 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 52 | T5.ER55.TRDV.02 | 2.700 | 6.300 | 6.300 |
| 53 | T5.ER55.TRDV.03 | 2.700 | 6.300 | 6.300 |
| 54 | T5.ER56.TR | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 55 | T5.ER56.TRDV | 0.500 | 6.300 | 0.400 |
| 56 | T5.ER57.TR.01 | 2.000 | 6.300 | 0.400 |
| 57 | T5.ER57.TR.02 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 58 | T5.ER57.TRDV.01 | 0.500 | 6.300 | 0.690 |
| 59 | T5.ER57.TRDV.02 | 0.800 | 6.300 | 0.690 |
| 60 | T5.ER58A.TR.01 | 2.000 | 6.300 | 0.400 |
| 61 | T5.ER58A.TR.02 | 2.000 | 6.300 | 0.400 |
| 62 | T5.ER58A.TRDV.01 | 0.600 | 6.300 | 0.690 |
| 63 | T5.ER58A.TRDV.02 | 3.000 | 6.300 | 6.300 |
| 64 | T5.ER58B.TR | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 65 | T5.ER58B.TRDV.01 | 0.500 | 6.300 | 0.690 |
| 66 | T5.ER58B.TRDV.02 | 3.000 | 6.300 | 6.000 |
| 67 | T5.ER59.TR | 2.000 | 6.300 | 0.400 |
| 68 | T5.GS51.TR | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 69 | T5.MAINTR.01 | 30.000 | 70.000 | 6.300 |
| 70 | T5.MAINTR.02 | 30.000 | 70.000 | 6.300 |
| 71 | T5.MAINTR.03 | 30.000 | 70.000 | 6.300 |
| 72 | TR | 1.250 | 6.000 | 0.400 |
| 73 | TR 1 | 1.000 | 6.000 | 0.400 |
| 74 | TR 2 | 0.800 | 6.000 | 0.400 |
| 75 | TR 3 | 2.000 | 6.000 | 0.400 |
| 76 | TR 4 | 2.000 | 6.000 | 0.400 |
| 77 | TR 5 | 2.000 | 6.000 | 0.400 |

| No | Transformer ID | Rating | | |
|----|----------------|--------|----------|--------|
| | | MVA | Prim. KV | Sec.KV |
| 78 | TR 6 | 2.500 | 6.300 | 0.400 |
| 79 | TRAFO 01 | 31.500 | 70.000 | 6.300 |
| 80 | TRAFO 02 | 31.500 | 70.000 | 6.300 |
| 81 | TRAFO 03 | 31.500 | 70.000 | 6.300 |
| 82 | TRAFO BARU | 18.000 | 70.000 | 6.300 |
| 83 | TRAFO LAMA | 18.000 | 70.000 | 6.300 |

Tabel 3.6 Data Transformator PT.SEMEN TONASA (3-Winding)

| NO | Transformer ID | Rating | | |
|----|----------------|------------|-------|-------|
| | | Winding | MVA | kV |
| 1 | TR.EP | Primary: | 3.000 | 6.300 |
| | | Secondary: | 1.500 | 0.400 |
| | | Tertiary: | 1.500 | 0.400 |
| 2 | TR.G-COOLER | Primary: | 3.000 | 6.300 |
| | | Secondary: | 1.500 | 0.690 |
| | | Tertiary: | 1.500 | 0.690 |
| 3 | TR.KLN.DRV | Primary: | 2.400 | 6.300 |
| | | Secondary: | 1.200 | 0.725 |
| | | Tertiary: | 1.200 | 0.725 |

Tabel 3.7Data Bus PT.SEMEN TONASA

| No | Bus | | |
|----|-------------|--------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 1 | 524RE | 0.400 | 2 |
| 2 | 580 TB 01 | 70.000 | 2 |
| 3 | 580 TB 02 | 70.000 | 2 |
| 4 | 581 SS 51 | 6.300 | 2 |
| 5 | 581 SS 52 | 6.300 | 2 |
| 6 | 581 SS 53 | 6.300 | 2 |
| 7 | 582 ER 51 | 6.300 | 2 |
| 8 | 582ER51LV01 | 0.400 | 2 |

| No | Bus | | |
|----|--------------|-------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 9 | 582 ER 52 | 6.300 | 2 |
| 10 | 582ER52ALV01 | 0.400 | 2 |
| 11 | 582 ER 53 | 6.300 | 2 |
| 12 | 582ER53LV01 | 0.400 | 2 |
| 13 | 582 ER 54 | 6.300 | 2 |
| 14 | 582ER54ALV01 | 0.400 | 2 |
| 15 | 582ER54BLV01 | 0.400 | 2 |
| 16 | 582 ER 55A | 6.300 | 2 |
| 17 | 582ER55ALV01 | 0.400 | 2 |
| 18 | 582ER55ALV02 | 0.400 | 2 |
| 19 | 582 ER 56 | 6.300 | 2 |
| 20 | 582ER56LV01 | 0.400 | 2 |
| 21 | 582 ER 57 | 6.300 | 2 |
| 22 | 582ER57LV01 | 0.400 | 2 |
| 23 | 582ER57LV02 | 0.400 | 2 |
| 24 | 582ER57LV03 | 0.690 | 2 |
| 25 | 582ER57LV04 | 0.690 | 2 |
| 26 | 582 ER 58A | 6.300 | 2 |
| 27 | 582ER58ALV01 | 0.400 | 2 |
| 28 | 582ER58ALV02 | 0.400 | 2 |
| 29 | 582 ER 58B | 6.300 | 2 |
| 30 | 582ER58BLV01 | 0.400 | 2 |
| 31 | 582 ER 59 | 6.300 | 2 |
| 32 | 582ER59LV01 | 0.400 | 2 |
| 33 | 583 GS 51 | 6.300 | 2 |
| 34 | B.51HF01 | 6.300 | 2 |
| 35 | B.51HF02 | 6.300 | 2 |
| 36 | B.51HF03 | 6.300 | 2 |
| 37 | B.52HF01 | 6.300 | 2 |
| 38 | B.52HF02 | 6.300 | 2 |
| 39 | B.52HF03 | 6.300 | 2 |
| 40 | B.53HF01 | 6.300 | 2 |
| 41 | B.53HF02 | 6.300 | 2 |
| 42 | B.C.MILL.T1 | 6.300 | 2 |
| 43 | B.C.MILL.T2 | 6.300 | 2 |

| No | Bus | | |
|----|--------------|-------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 44 | B.CMF | 6.300 | 2 |
| 45 | B.CMT | 6.300 | 2 |
| 46 | B.FF.532FN11 | 6.300 | 2 |
| 47 | B.FF.C.MILL1 | 6.300 | 2 |
| 48 | B.FF.C.MILL2 | 6.300 | 2 |
| 49 | B.FMCL1 | 6.300 | 2 |
| 50 | B.FMCL2 | 6.300 | 2 |
| 51 | B.LSCR1 | 6.300 | 2 |
| 52 | B.LSCR2 | 6.300 | 2 |
| 53 | B.RMIDF | 6.300 | 2 |
| 54 | B.RMMD | 6.300 | 2 |
| 55 | B.TD1 | 6.300 | 2 |
| 56 | B.TD.51.1 | 6.300 | 2 |
| 57 | B.TD.52.1 | 6.300 | 2 |
| 58 | B.TD.53.1 | 6.300 | 2 |
| 59 | B.TD.53.2 | 6.300 | 2 |
| 60 | B.TD.54.1 | 6.300 | 2 |
| 61 | B.TD.54.2 | 6.300 | 2 |
| 62 | B.TD.55A.1 | 6.300 | 2 |
| 63 | B.TD.55A.2 | 6.300 | 2 |
| 64 | B.TD.55B.1 | 6.300 | 2 |
| 65 | B.TD.56.1 | 6.300 | 2 |
| 66 | B.TD.57.1 | 6.300 | 2 |
| 67 | B.TD.57.2 | 6.300 | 2 |
| 68 | B.TD.58A.1 | 6.300 | 2 |
| 69 | B.TD.58A.2 | 6.300 | 2 |
| 70 | B.TD.58B.1 | 6.300 | 2 |
| 71 | B.TD.59.1 | 6.300 | 2 |
| 72 | B.TR.BFC | 6.300 | 2 |
| 73 | B.TR.BFCM | 6.300 | 2 |
| 74 | B.TR.EPF | 6.300 | 2 |
| 75 | B.TR.EPFC | 6.300 | 2 |
| 76 | B.TR.GC | 6.300 | 2 |
| 77 | B.TR.IDF1 | 6.300 | 2 |
| 78 | B.TR.IDF2 | 6.300 | 2 |

| No | Bus | | |
|-----|-------------------|-------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 79 | B.TR.KLN.DRV | 6.300 | 2 |
| 80 | B.TR.RMCL | 6.300 | 2 |
| 81 | B.TR-EP | 6.300 | 2 |
| 82 | B.VFD1 | 0.400 | 2 |
| 83 | B.VFD2 | 6.300 | 2 |
| 84 | B.VFD3 | 6.300 | 2 |
| 85 | B.VFD4 | 0.400 | 2 |
| 86 | B.VFD5 | 0.690 | 2 |
| 87 | B.VFD6 | 0.690 | 2 |
| 88 | B.VFD7 | 0.690 | 2 |
| 89 | B.VFD8 | 0.690 | 2 |
| 90 | B.VFD9 | 0.400 | 2 |
| 91 | B.VFD10 | 6.300 | 2 |
| 92 | B.VFD11 | 0.690 | 2 |
| 93 | B.VFD13 | 6.000 | 2 |
| 94 | B.VFD14 | 0.690 | 2 |
| 95 | BT1.2 | 6.300 | 2 |
| 96 | BT2.2 | 6.300 | 2 |
| 97 | BT3.2 | 6.300 | 2 |
| 98 | BTGE.G01.BB6KV.01 | 6.300 | 2 |
| 99 | BTGE.G01.BB6KV.03 | 6.300 | 2 |
| 100 | BTGE.G01.BB6KV.04 | 6.300 | 2 |
| 101 | BTGE.G01.BB6KV.05 | 6.300 | 2 |
| 102 | BTGE.G01.BB6KV.07 | 6.300 | 2 |
| 103 | BTGE.G01.BB6KV.08 | 6.300 | 2 |
| 104 | BTGE.G01.BB6KV.09 | 6.300 | 2 |
| 105 | BTGE.G01.BB6KV.10 | 6.300 | 2 |
| 106 | BTGE.G01.BB6KV.11 | 6.300 | 2 |
| 107 | BTGE.G01.BB6KV.12 | 6.300 | 2 |
| 108 | BTGE.G01.BB6KV.13 | 6.300 | 2 |
| 109 | BTGE.G01.BB6KV.14 | 6.300 | 2 |
| 110 | BTGE.G01.BB6KV.15 | 6.300 | 2 |
| 111 | BTGE.G02.BB6KV.01 | 6.300 | 2 |
| 112 | BTGE.G02.BB6KV.03 | 6.300 | 2 |
| 113 | BTGE.G02.BB6KV.04 | 6.300 | 2 |

| No | Bus | | |
|-----|--------------------|--------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 114 | BTGE.G02.BB6KV.05 | 6.300 | 2 |
| 115 | BTGE.G02.BB6KV.07 | 6.300 | 2 |
| 116 | BTGE.G02.BB6KV.08 | 6.300 | 2 |
| 117 | BTGE.G02.BB6KV.09 | 6.300 | 2 |
| 118 | BTGE.G02.BB6KV.10 | 6.300 | 2 |
| 119 | BTGE.G02.BB6KV.11 | 6.300 | 2 |
| 120 | BTGE.G02.BB6KV.12 | 6.300 | 2 |
| 121 | BTGE.G02.BB6KV.13 | 6.300 | 2 |
| 122 | BTGE.G02.BB6KV.14 | 6.300 | 2 |
| 123 | BTGE.G02.BB6KV.15 | 6.300 | 2 |
| 124 | BTGN.G01.BB11KV.01 | 11.000 | 2 |
| 125 | BTGN.G01.BB11KV.02 | 11.000 | 2 |
| 126 | BTGN.G01.BB11KV.03 | 11.000 | 2 |
| 127 | BTGN.G01.BB6KV.01 | 6.300 | 2 |
| 128 | BTGN.G01.BB6KV.02 | 6.300 | 2 |
| 129 | BTGN.G01.BB6KV.04 | 6.300 | 2 |
| 130 | BTGN.G01.BB6KV.05 | 6.300 | 2 |
| 131 | BTGN.G01.BB6KV.06 | 6.300 | 2 |
| 132 | BTGN.G01.BB6KV.07 | 6.300 | 2 |
| 133 | BTGN.G01.BB6KV.08 | 6.300 | 2 |
| 134 | BTGN.G01.BB6KV.09 | 6.300 | 2 |
| 135 | BTGN.G01.BB6KV.10 | 6.300 | 2 |
| 136 | BTGN.G01.BB6KV.11 | 6.300 | 2 |
| 137 | BTGN.G01.BB6KV.12 | 6.300 | 2 |
| 138 | BTGN.G02.BB11KV.01 | 11.000 | 2 |
| 139 | BTGN.G02.BB11KV.02 | 11.000 | 2 |
| 140 | BTGN.G02.BB11KV.03 | 11.000 | 2 |
| 141 | BTGN.G02.BB6KV.01 | 6.300 | 2 |
| 142 | BTGN.G02.BB6KV.02 | 6.300 | 2 |
| 143 | BTGN.G02.BB6KV.04 | 6.300 | 2 |
| 144 | BTGN.G02.BB6KV.05 | 6.300 | 2 |
| 145 | BTGN.G02.BB6KV.06 | 6.300 | 2 |
| 146 | BTGN.G02.BB6KV.07 | 6.300 | 2 |
| 147 | BTGN.G02.BB6KV.08 | 6.300 | 2 |
| 148 | BTGN.G02.BB6KV.09 | 6.300 | 2 |

| No | Bus | | |
|-----|-------------------|--------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 149 | BTGN.G02.BB6KV.10 | 6.300 | 2 |
| 150 | BTGN.G02.BB6KV.11 | 6.300 | 2 |
| 151 | Bus1 | 0.725 | 2 |
| 152 | Bus2 | 0.725 | 2 |
| 153 | Bus3 | 0.400 | 2 |
| 154 | Bus4 | 6.300 | 2 |
| 155 | Bus5 | 0.400 | 2 |
| 156 | Bus6 | 0.400 | 2 |
| 157 | Bus7 | 6.300 | 2 |
| 158 | Bus9 | 6.300 | 2 |
| 159 | Bus10 | 6.300 | 2 |
| 160 | Bus11 | 6.300 | 2 |
| 161 | Bus12 | 6.300 | 2 |
| 162 | Bus13 | 6.300 | 2 |
| 163 | Bus16 | 6.300 | 2 |
| 164 | Bus17 | 6.300 | 2 |
| 165 | Bus22 | 0.400 | 2 |
| 166 | Bus23 | 70.000 | 1 |
| 167 | Bus25 | 0.400 | 2 |
| 168 | Bus26 | 6.300 | 2 |
| 169 | Bus27 | 6.300 | 2 |
| 170 | Bus168 | 6.300 | 2 |
| 171 | Bus171 | 6.300 | 2 |
| 172 | Bus172 | 6.300 | 2 |
| 173 | Bus174 | 6.300 | 2 |
| 174 | Bus175 | 6.300 | 2 |
| 175 | Bus176 | 6.300 | 2 |
| 176 | Bus177 | 0.400 | 2 |
| 177 | Bus178 | 0.400 | 2 |
| 178 | Bus182 | 6.300 | 2 |
| 179 | Bus183 | 0.400 | 2 |
| 180 | Bus184 | 0.400 | 2 |
| 181 | Bus185 | 6.300 | 2 |
| 182 | Bus186 | 0.400 | 2 |
| 183 | Bus187 | 0.400 | 2 |

| No | Bus | | |
|-----|--------|--------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 184 | Bus188 | 6.300 | 2 |
| 185 | Bus189 | 0.400 | 2 |
| 186 | Bus190 | 0.400 | 2 |
| 187 | Bus191 | 6.300 | 2 |
| 188 | Bus192 | 0.400 | 2 |
| 189 | Bus193 | 0.400 | 2 |
| 190 | Bus196 | 6.300 | 2 |
| 191 | Bus198 | 6.300 | 2 |
| 192 | Bus202 | 6.300 | 2 |
| 193 | Bus203 | 0.400 | 2 |
| 194 | Bus204 | 0.400 | 2 |
| 195 | Bus205 | 6.300 | 2 |
| 196 | Bus206 | 0.400 | 2 |
| 197 | Bus207 | 0.400 | 2 |
| 198 | Bus209 | 70.000 | 2 |
| 199 | Bus215 | 6.300 | 2 |
| 200 | Bus217 | 70.000 | 2 |
| 201 | Bus219 | 6.300 | 2 |
| 202 | Bus220 | 6.300 | 2 |
| 203 | Bus221 | 1.725 | 2 |
| 204 | Bus222 | 6.300 | 2 |
| 205 | Bus223 | 1.725 | 2 |
| 206 | Bus224 | 6.300 | 2 |
| 207 | Bus228 | 0.400 | 2 |
| 208 | Bus229 | 0.400 | 2 |
| 209 | Bus230 | 6.300 | 2 |
| 210 | Bus231 | 0.400 | 2 |
| 211 | Bus232 | 0.400 | 2 |
| 212 | Bus233 | 6.300 | 2 |
| 213 | Bus236 | 6.300 | 2 |
| 214 | Bus237 | 1.725 | 2 |
| 215 | Bus238 | 6.300 | 2 |
| 216 | Bus239 | 1.725 | 2 |
| 217 | Bus248 | 6.300 | 2 |
| 218 | Bus249 | 0.400 | 2 |

| No | Bus | | |
|-----|--------|--------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 219 | Bus250 | 0.400 | 2 |
| 220 | Bus252 | 6.300 | 2 |
| 221 | Bus253 | 6.300 | 2 |
| 222 | Bus261 | 0.400 | 2 |
| 223 | Bus262 | 0.400 | 2 |
| 224 | Bus263 | 6.300 | 2 |
| 225 | Bus264 | 0.400 | 2 |
| 226 | Bus265 | 0.400 | 2 |
| 227 | Bus266 | 6.300 | 2 |
| 228 | Bus267 | 6.300 | 2 |
| 229 | Bus272 | 6.300 | 2 |
| 230 | Bus278 | 6.300 | 2 |
| 231 | Bus279 | 6.300 | 2 |
| 232 | Bus280 | 6.300 | 2 |
| 233 | Bus284 | 6.300 | 2 |
| 234 | Bus285 | 0.400 | 2 |
| 235 | Bus286 | 0.400 | 2 |
| 236 | Bus287 | 6.300 | 2 |
| 237 | Bus288 | 0.400 | 2 |
| 238 | Bus289 | 0.400 | 2 |
| 239 | Bus290 | 6.300 | 2 |
| 240 | Bus291 | 0.400 | 2 |
| 241 | Bus292 | 0.400 | 2 |
| 242 | Bus300 | 6.300 | 2 |
| 243 | Bus301 | 6.300 | 2 |
| 244 | Bus302 | 6.300 | 2 |
| 245 | Bus307 | 6.300 | 2 |
| 246 | Bus308 | 0.400 | 2 |
| 247 | Bus309 | 0.400 | 2 |
| 248 | Bus310 | 6.300 | 2 |
| 249 | Bus311 | 70.000 | 2 |
| 250 | Bus315 | 6.300 | 2 |
| 251 | Bus320 | 6.300 | 2 |
| 252 | Bus324 | 6.300 | 2 |
| 253 | Bus325 | 0.400 | 2 |

| No | Bus | | |
|-----|--------|--------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 254 | Bus326 | 0.400 | 2 |
| 255 | Bus327 | 6.300 | 2 |
| 256 | Bus328 | 0.400 | 2 |
| 257 | Bus329 | 0.400 | 2 |
| 258 | Bus333 | 6.300 | 2 |
| 259 | Bus334 | 6.300 | 2 |
| 260 | Bus335 | 6.300 | 2 |
| 261 | Bus336 | 6.300 | 2 |
| 262 | Bus337 | 6.300 | 2 |
| 263 | Bus338 | 6.300 | 2 |
| 264 | Bus344 | 6.300 | 2 |
| 265 | Bus345 | 0.400 | 2 |
| 266 | Bus346 | 0.400 | 2 |
| 267 | Bus350 | 6.300 | 2 |
| 268 | Bus351 | 6.300 | 2 |
| 269 | Bus352 | 6.300 | 2 |
| 270 | Bus353 | 70.000 | 2 |
| 271 | Bus358 | 6.300 | 1 |
| 272 | Bus360 | 70.000 | 1 |
| 273 | Bus364 | 6.300 | 1 |
| 274 | Bus365 | 0.400 | 1 |
| 275 | Bus366 | 0.400 | 1 |
| 276 | Bus374 | 0.400 | 1 |
| 277 | Bus375 | 0.400 | 1 |
| 278 | Bus376 | 6.300 | 1 |
| 279 | Bus377 | 0.400 | 1 |
| 280 | Bus378 | 0.400 | 1 |
| 281 | Bus379 | 6.300 | 1 |
| 282 | Bus380 | 6.300 | 1 |
| 283 | Bus381 | 0.400 | 1 |
| 284 | Bus382 | 0.400 | 1 |
| 285 | Bus383 | 6.300 | 1 |
| 286 | Bus384 | 0.400 | 1 |
| 287 | Bus385 | 0.400 | 1 |
| 288 | Bus386 | 6.300 | 1 |

| No | Bus | | |
|-----|--------|-------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 289 | Bus387 | 6.300 | 1 |
| 290 | Bus396 | 6.300 | 1 |
| 291 | Bus407 | 6.300 | 1 |
| 292 | Bus408 | 0.400 | 1 |
| 293 | Bus409 | 0.400 | 1 |
| 294 | Bus417 | 0.400 | 1 |
| 295 | Bus418 | 0.400 | 1 |
| 296 | Bus419 | 6.300 | 1 |
| 297 | Bus420 | 0.400 | 1 |
| 298 | Bus421 | 0.400 | 1 |
| 299 | Bus422 | 6.300 | 1 |
| 300 | Bus423 | 6.300 | 1 |
| 301 | Bus437 | 6.300 | 1 |
| 302 | Bus441 | 0.400 | 1 |
| 303 | Bus442 | 0.400 | 1 |
| 304 | Bus443 | 6.300 | 1 |
| 305 | Bus454 | 0.400 | 1 |
| 306 | Bus455 | 0.400 | 1 |
| 307 | Bus456 | 6.300 | 1 |
| 308 | Bus457 | 6.300 | 1 |
| 309 | Bus461 | 0.400 | 1 |
| 310 | Bus462 | 0.400 | 1 |
| 311 | Bus463 | 6.300 | 1 |
| 312 | Bus467 | 0.400 | 1 |
| 313 | Bus468 | 0.400 | 1 |
| 314 | Bus469 | 6.300 | 1 |
| 315 | Bus470 | 0.400 | 1 |
| 316 | Bus471 | 0.400 | 1 |
| 317 | Bus472 | 6.300 | 1 |
| 318 | Bus480 | 0.400 | 1 |
| 319 | Bus481 | 0.400 | 1 |
| 320 | Bus482 | 6.300 | 1 |
| 321 | Bus483 | 0.400 | 1 |
| 322 | Bus484 | 0.400 | 1 |
| 323 | Bus485 | 6.300 | 1 |

| No | Bus | | |
|----------------------------|-----------------|--------|---------|
| | ID | kV | Sub-sys |
| 324 | Bus486 | 6.300 | 1 |
| 325 | Bus488 | 70.000 | 1 |
| 326 | Bus493 | 70.000 | 2 |
| 327 | Bus494 | 70.000 | 2 |
| 328 | Bus507 | 6.300 | 2 |
| 329 | Bus508 | 6.300 | 2 |
| 330 | Bus512 | 6.300 | 2 |
| 331 | Bus513 | 0.400 | 2 |
| 332 | Bus514 | 0.400 | 2 |
| 333 | Bus515 | 6.300 | 2 |
| 334 | Bus516 | 0.400 | 2 |
| 335 | Bus517 | 0.400 | 2 |
| 336 | BUSBAR | 6.300 | 2 |
| 337 | BUSBAR 1 | 6.300 | 1 |
| 338 | BUSBAR 2 | 6.300 | 1 |
| 339 | DIST.EBB22KV.01 | 22.000 | 2 |
| 340 | DIST.EBB22KV.02 | 22.000 | 2 |
| 341 | DIST.EBB22KV.04 | 22.000 | 2 |
| 342 | DIST.EBB22KV.05 | 22.000 | 2 |
| 343 | DIST.EBB70KV.03 | 70.000 | 2 |
| 344 | DIST.L1BB70KV | 70.000 | 2 |
| 345 | DIST.L2BB70KV | 70.000 | 2 |
| 346 | DIST.NBB70KV.03 | 70.000 | 2 |
| 347 | SB.SS51.1 | 6.300 | 2 |
| 348 | SB.SS51.3 | 6.300 | 2 |
| 349 | SG1 | 6.300 | 2 |
| 350 | SG2 | 6.300 | 2 |
| 351 | SG3 | 6.300 | 2 |
| 352 | SG4 | 6.300 | 2 |
| 353 | SG5 | 6.300 | 2 |
| 354 | SG6 | 6.300 | 2 |
| 355 | SG7 | 6.300 | 2 |
| Total Number of Buses: 355 | | | |

Tabel 3.8 Data Bus Generator PT.SEMEN TONASA

| Generation Bus | | |
|--------------------|--------|-----------------|
| ID | kV | Type |
| BTGE.G01.BB6KV.01 | 6.300 | Voltage Control |
| BTGE.G02.BB6KV.01 | 6.300 | Voltage Control |
| BTGN.G01.BB11KV.01 | 11.000 | Voltage Control |
| BTGN.G02.BB11KV.01 | 11.000 | Swing |
| Bus488 | 70.000 | Swing |

3.3.4. Data Beban

Jumlah beban yang terpasang pada plant BTG BARU menanggung beban 17 motor. Sisi plant BTG LAMA menanggung beban 18 motor dan 2 *static load*. Sisi plant Tonasa V menanggung beban 68 *lump load*, 3 *static load*, dan 22 motor. Sisi plant Tonasa IV menanggung beban 16 *static load* dan 20 motor. Dan untuk sisi plant Tonasa II&III menanggung beban 18 motor dan 18 *static load*.

3.4. Pemodelan Sistem

3.4.1. Model Generator

Pada simulasi kestabilan transien diperlukan data reaktansi dan *time constant* yang diperoleh dari datasheet generator. Tabel 3.9 dan 3.10 merupakan data reaktansi dan *time constant* dari *Steam Turbine Generator* pada PT. SEMEN TONASA.

Tabel 3.9 Data Reaktansi Generator PT.SEMEN TONASA

| Reaktansi | STG | |
|-------------------|---------------|---------------|
| | BTGE.GEN01/02 | BTGN.GEN01/02 |
| X _d | 191.4 | 176 |
| X _d ' | 19.62 | 28.7 |
| X _d '' | 12.22 | 18.1 |
| X ₂ | 14.9 | 18.1 |
| X ₀ | 6.37 | 7.3 |

Tabel 3.10 *Time Constant* Generator PT. SEMEN TONASA

| SIMBOL | BTGN.GEN(01-02) | BTGE.GEN(01-02) |
|--------|-----------------|-----------------|
| Tdo' | 9.2 sec | 6.5 sec |
| Tdo'' | 0.042 sec | 0.035 sec |
| Tqo' | 1.1 sec | 1.25 sec |
| Tqo'' | 0.042 sec | 0.035 sec |

3.4.2 Inersia Generator

Data yang sangat penting untuk mendapatkan analisis akurat dari kestabilan transien adalah inersia generator. Pada *datasheet* generator, parameter yang diketahui yaitu rotor inersia 2x35 MW sebesar 3710 kgm^2 , Sedangkan untuk rotor inersia generator 2x25 MW sebesar 3000 kgm^2 . Maka untuk mencari nilai inersia generator dapat ditunjukkan pada persamaan (3.1), (3.2), dan (3.3):

$$H = \frac{5,48 \times 10^{-9} \times WR^2 \times rpm^2}{MVA} \quad (3.1)$$

- $$H_{(2x35 \text{ MW})} = \frac{5,48 \times 10^{-9} \times 3710 \times 1500^2}{43,75} = 1,045 \quad (3.2)$$

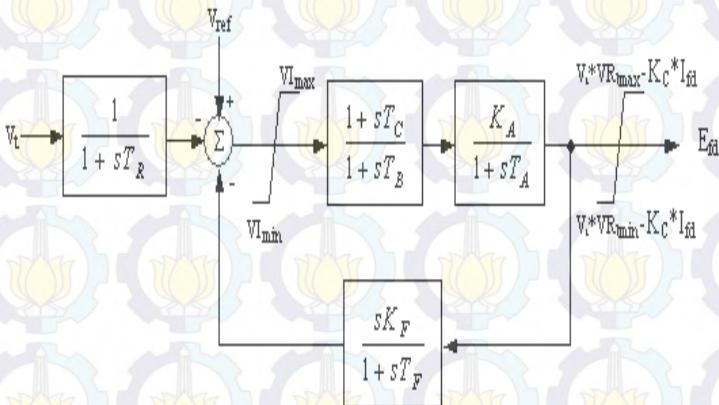
- $$H_{(2x35 \text{ MW})} = \frac{5,48 \times 10^{-9} \times 3000 \times 3000^2}{31,25} = 4,74 \quad (3.3)$$

3.4.3 Model Exciter

Pada sistem kelistrikan PT.SEMEN TONASA menggunakan *exciter* tipe ST1 untuk Generator BTGN.GEN(01-02) dan BTGE.GEN(01-02) ditunjukkan pada table 3.11. Sedangkan untuk diagram blok *exciter* tipe ST1 ditunjukkan pada gambar 3.2. Model *block diagram* pada saat simulasi kestabilan transien didapatkan dari ETAP.

Tabel 3.11 Parameter *exciter* tipe ST1

| Parameter | Definition | Unit |
|-----------|--|------|
| VRmax | Maximum value of the regulator output voltage | p.u. |
| VRmin | Minimum value of the regulator output voltage | p.u. |
| VImax | Maximum internal signal within voltage regulator | p.u. |
| VImin | Minimum internal signal within voltage regulator | p.u. |
| KA | Regulator gain | p.u. |
| KC | Regulator gain | p.u. |
| KF | Regulator stabilizing circuit gain | p.u. |
| TA | Regulator amplifier time constant | Sec. |
| TB | Voltage Regulator amplifier time constant | Sec. |
| TC | Voltage Regulator amplifier time constant | Sec. |
| TF | Regulator stabilizing circuit time constant | Sec. |
| TR | Regulator input filter time constant | Sec. |



Gambar 3.2 Diagram Blok *Exciter* Tipe ST1

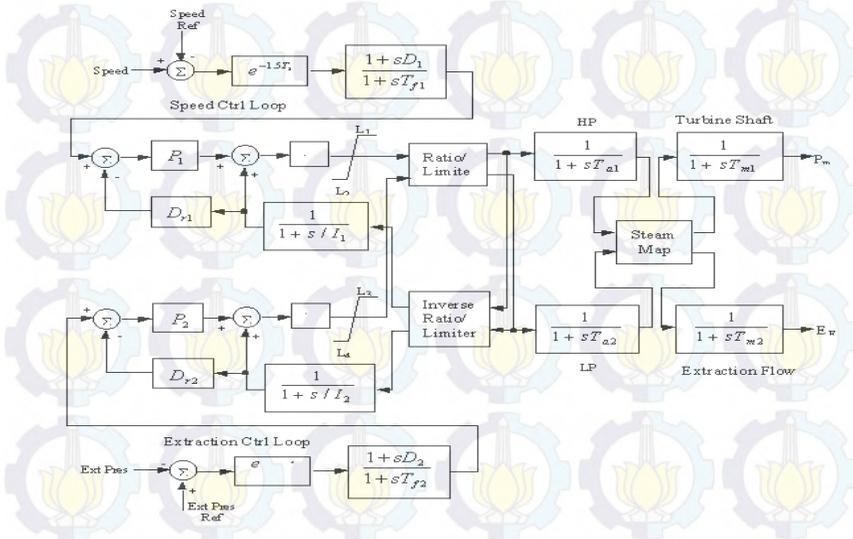
3.4.4 Model Governor

Pada sistem kelistrikan PT.SEMEN TONASA masing-masing menggunakan *governor* tipe 2301 untuk generator 2x35 MW dan tipe 505 untuk generator 2x25 MW. Model *governor* tipe 505 ditunjukkan pada tabel 3.12 dan gambar 3.3. Sedangkan untuk model *governor* tipe 2301 ditunjukkan pada tabel 3.13 dan gambar *block diagram* pada gambar 3.4. Model *block diagram* pada saat simulasi kestabilan transien didapatkan dari ETAP.

Tabel 3.12 Parameter *governor* tipe 505

| Parameter | Definition | Unit |
|------------------|---|-------------|
| Mode | Droop or Isoch | |
| Droop1 | Steady-state speed droop | % |
| Droop2 | Extraction loop droop | % |
| Efmax | Max. extraction flow | T/Hr |
| ExtFlow | Turbine extraction flow | % |
| ExtPress | Extraction pressure | % |
| Hpa | Min. extraction @ max. power | T/Hr |
| HPb | Max. extraction @ min. power | T/Hr |
| HPc | Min. extraction @ min. power | T/Hr |
| Hpmax | Max. HP flow | T/Hr |
| I1 <D> | Speed loop integral (Droop mode) | % |
| I1 <I> | Speed loop integral gain in (Isoch mode) | % |
| I2 | Extraction loop integral gain | % |
| L1 | Up limit for speed loop output | % |
| L2 | Low limit for speed loop output | % |
| L3 | Up limit for extraction loop output | % |
| L4 | Low limit for extraction loop output | % |
| P1 <D> | Speed loop proportional gain (Droop mode) | % |
| P1 <I> | Speed loop proportional gain (Isoch mode) | % |
| P2 | Extraction loop proportional gain | % |

| Parameter | Definition | Unit |
|------------------|--|-------------|
| RampRate | Speed reference ramp rate | % |
| Sa | Max. power @ min. extraction | %/Sec. |
| Sb | Min. power @ max. extraction | kW |
| Sc | Min. power @ min. extraction | kW |
| SDR1 | Speed loop parameter (Droop mode) | % |
| SDR1 <I> | Speed loop parameter (Isoch mode) | % |
| SDR2 | Extraction loop parameter | % |
| Smax | Max. power | kW |
| Ta1 | HP valve actuator time constant | Sec. |
| Ta2 | LV valve actuator time constant | Sec. |
| Tm1 | Turbine time constant (shaft power output) | Sec. |
| Tm2 | Turbine time constant (extraction flow) | Sec. |
| TS | Controller sample time | Sec. |

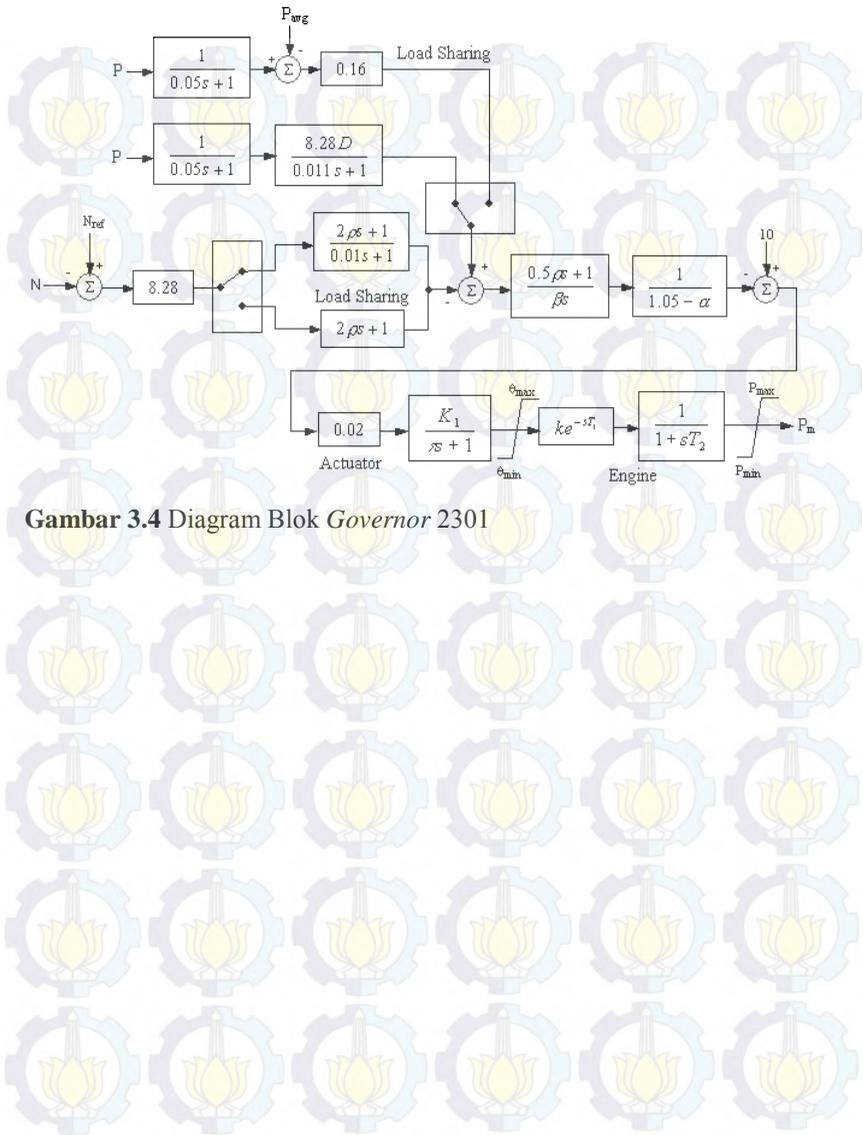


Gambar 3.3 Diagram Blok Governor Tipe 505

Tabel 3.13 Parameter *governor* tipe 2301

| Parameter | Definition | Unit |
|------------------------------|--|-------------|
| Mode | Droop or Isoch | |
| LS GP# | Load Sharing Group Number | |
| Droop | Steady-state speed droop in second | % |
| <input type="checkbox"/> max | Min. shaft position in degrees | Deg |
| <input type="checkbox"/> min | Max. shaft position in degrees | Deg |
| <input type="checkbox"/> | Gain setting | |
| <input type="checkbox"/> | Reset setting | |
| <input type="checkbox"/> | Actuator compensation setting | |
| K1 | Partially very high pressure power fraction | Deg/A |
| <input type="checkbox"/> | Actuator time constant | Sec. |
| T1 | Engine Dead Time Constant | Sec. |
| T2 | Amplifier / compensator time constant | Sec. |
| Pmax | Maximum shaft power | MW or kW* |
| Pmin | Minimum shaft power | MW or kW* |
| k | Internal variable (= MVA/(<input type="checkbox"/> max- <input type="checkbox"/> max)) | MW/Deg |

*Depends on the setting of the generator in the Rating page (MW or kW button)



Gambar 3.4 Diagram Blok *Governor 2301*

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. SEMEN TONASA

4.1. Pemodelan sistem kelistrikan PT. SEMEN TONASA

Gambar di lampiran merupakan hasil pemodelan *single line diagram* PT. SEMEN TONASA yang dimodelkan berdasarkan data-data yang ada. Setelah melakukan pemodelan sistem dilanjutkan dengan melakukan simulasi *transient stability* menggunakan *software* ETAP 7.5.0 berdasarkan kasus-kasus yang dapat mengganggu kestabilan sistem. Pada tugas akhir ini akan dianalisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem saat terjadi *generator outage*, *motor starting* dan gangguan hubung singkat.

4.2. Total pembangkitan dan beban PT SEMEN TONASA

Tabel 4.1. Total pembangkitan dan beban di PT. SEMEN TONASA

| Keterangan | MW | Mvar | MVA | % PF |
|------------------------|---------|---------|---------|------------|
| Sources Swing Bus (es) | 41.920 | 13.720 | 44.108 | 95.04 Lag |
| Sources Non-Swing Bus | 71.000 | 21.756 | 74.259 | 95.61 Lag |
| Total Demand | 112.920 | 35.476 | 118.362 | 95.40 Lag |
| Total Motor Load | 87.003 | 66.424 | 109.461 | 79.48 Lag |
| Total Static Load | 22.182 | -7.436 | 23.993 | 95.08 Lead |
| Apparent Losses | 3.106 | -23.512 | | |

Total pembangkitan di PT. Pertamina RU VI Balongan sebesar 118,367 MVA dengan faktor daya 95,04 *lagging* terdiri dari generator yang dioperasikan *swing* sebesar 44,108 MVA dengan faktor daya 95,04 *lagging* dan generator yang dioperasikan *voltage control* sebesar 76.259 MVA dengan faktor daya 95,61 *lagging*. Sedangkan untuk beban, total beban motor di PT. SEMEN TONASA sebesar 109,461 MVA dengan faktor daya 79,48 *lagging* dan total beban statis sebesar 23,993 MVA dengan faktor daya 95.08 *leading*.

4.3. Studi kasus kestabilan transien

Dalam analisis stabilitas transien di PT. SEMEN TONASA akan disimulasikan beberapa kasus gangguan yang dapat mengganggu stabilitas sistem diantaranya :

a) *Generator outage* :

Pada kasus ini terdapat terdapat salah satu generator (BTGN.GEN01) dan satu generator (BTGE.GEN01) yang lepas dari sistem.

b) *Hubung singkat* :

Pada kasus ini disimulasikan gangguan hubung singkat pada setiap level tegangan :

- Tegangan 70 kV : bus 580 TB 02
- Tegangan 22 kV : bus DIST.EBB22KV.02
- Tegangan 11 kV : bus BTGN.G01.BB11KV.02
- Tegangan 6.3 kV : bus SG1
- Tegangan 0,4 kV : bus bus25

c) *Motor starting* :

Pada kasus ini disimulasikan saat terjadi *starting* motor-motor terbesar pada sistem (Motor M532FN11).

Tabel 4.2 menjelaskan studi kasus yang telah disimulasikan secara lengkap :

Tabel 4.2. Studi kasus kestabilan transien

| Kasus | Keterangan | Waktu(s) |
|------------------|------------------------------|----------|
| Generator Outage | | |
| Gen Out 1 | Generator BTGE.GEN01 trip | 5 |
| Gen Out 1 LS | Generator BTGE.GEN01 trip | 5 |
| | <i>Load shedding</i> tahap 1 | 5,341 |
| | <i>Load shedding</i> tahap 2 | 6.072 |
| Gen Out 1 | Generator BTGE.GEN01 trip | 5 |
| Gen Out Status | Generator BTGE.GEN01 trip | 5 |
| | <i>Load Shedding</i> Status | 5,2 |
| Gen Out 2 | Generator BTGN.GEN01 trip | 5 |
| Gen Out 2 LS | Generator BTGN.GEN01 trip | 5 |

| Kasus | Keterangan | Waktu(s) |
|--------------------|---|----------|
| Generator Outage | | |
| | <i>Load shedding</i> tahap 1 | 5,401 |
| | <i>Load shedding</i> tahap 2 | 5,593 |
| | <i>Load shedding</i> tahap 3 | 5,945 |
| Gen Out 2 | Generator BTGN.GEN01 trip | 5 |
| Gen Out 2 Status | Generator BTGN.GEN01 trip | 5 |
| | <i>Load Shedding</i> Status | 5,2 |
| Short Circuit | | |
| SC 70 kV | Hubung singkat 3 fasa pada bus 580 TB 02 | 2 |
| | T5.CB70KV.06 open | 2,3 |
| SC 22 kV | Hubung singkat 3 fasa pada bus DIST.EBB22KV.02 | 2 |
| | CB DIST.CB70KVE.05 open | 2,3 |
| SC 11 kV | Hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11KV.02 | 2 |
| | (CB33,BTGN.CB11KVG01.02,BTGN.CB11KV01.01) open | 2,1 |
| | (DIST.CB70KVN.01,BTGN.CB6KVG01.01) open | 2,3 |
| SC 11 KV LS | Hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11KV.02 | 2 |
| | (CB33,BTGN.CB11KVG01.02,BTGN.CB11KV01.01) open | 2,1 |
| | (DIST.CB70KVN.01,BTGN.CB6KVG01.01) open | 2,3 |
| | <i>Load shedding</i> tahap 1 | 2,781 |
| | <i>Load shedding</i> tahap 2 | 2,953 |
| | <i>Load shedding</i> tahap 3 | 3,285 |
| SC 11 KV LS Status | Hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11KV.02 | 2 |
| | (CB33,BTGN.CB11KVG01.02,BTGN.CB11KV01.01) open | 2,1 |
| | (DIST.CB70KVN.01,BTGN.CB6KVG01.01) open | 2,3 |
| | <i>Load Shedding</i> Status | 2,6 |
| SC6,3KV | Hubung singkat 3 fasa pada bus SG1 | 2 |

| Kasus | Keterangan | Waktu(s) |
|----------------|---|----------|
| Short Circuit | | |
| | CB HVSG 3 open | 2,3 |
| SC0,4KV | Hubung singkat 3 fasa pada bus bus25 | 2 |
| | CB T5.GS51.CB6KV.03 | 2,3 |
| Motor starting | | |
| Mstart | CB T5.ER54.CB6KV.04 Closed (M532FN11 start) | 2 |

Dari kasus di atas, untuk studi kasus *generator outage* dan hubung singkat bus yang digunakan sebagai indikasi stabilitas sistem adalah :

- 580 TB 01 : bus yang mewakili tegangan 70 KV
- DIST.EBB22KV.02 : bus yang mewakili tegangan 22 KV
- BTGN.G02.BB11KV.02 : bus yang mewakili tegangan 11 KV
- 582 ER 55A : bus yang mewakili tegangan 6,3 KV
- Bus286 : bus yang mewakili tegangan 0,4 KV

Sedangkan untuk kasus *motor starting* bus yang digunakan sebagai indikasi stabilitas sistem adalah :

- 582 ER 54 : bus yang terhubung dengan motor

Selanjutnya langkah-langkah yang akan dilakukan dalam analisis kestabilan transien yaitu:

- Mengamati respon frekuensi dan tegangan sistem serta sudut rotor generator.
- Menganalisis apakah respon frekuensi dan tegangan serta sudut rotor kembali stabil atau tidak sesuai dengan standar yang diijinkan.
- Jika sistem belum mampu mencapai kondisi stabil sesuai standar, maka dilakukan mekanisme pelepasan beban (*load shedding*).

4.4. Simulasi dan analisis kestabilan transien

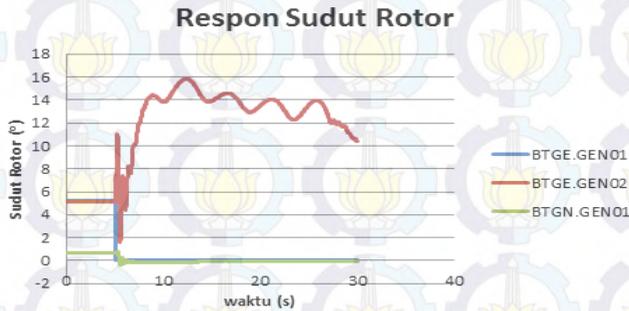
Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dan analisis dari setiap kasus yang disimulasikan. Respon sistem yang dianalisis meliputi respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem.

4.4.1. Simulasi kestabilan transien untuk kasus *generator outage*

Pada sub bab ini akan dianalisis hasil simulasi untuk kasus *generator outage*.

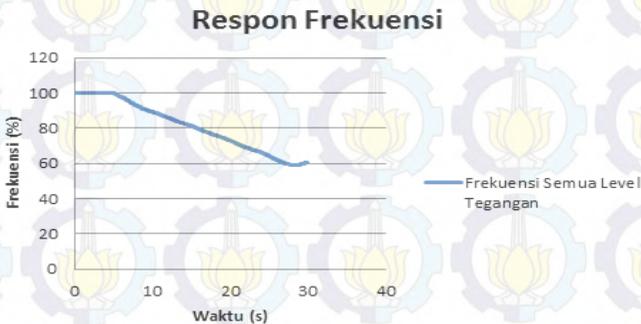
4.4.1.1. Studi kasus Gen Out 1 : Generator BTGE.GEN.01 lepas dari sistem ($t=5$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika salah satu generator lepas dari sistem yaitu generator BTGE.GEN.01. Lepasnya generator BTGE.GEN.01 disimulasikan pada detik ke 5. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.1, 4.2, dan 4.3.



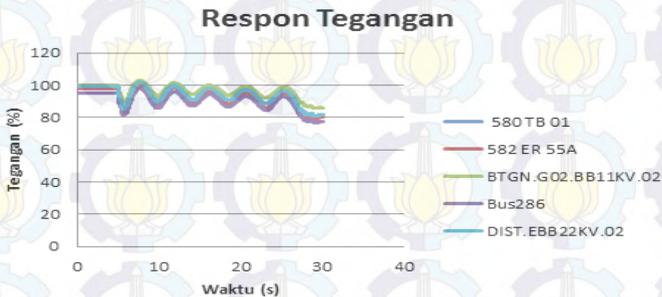
Gambar 4.1. Respon sudut rotor saat generator BTGE.GEN.01 lepas dari sistem

Pada gambar 4.1 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5.23° dan berubah menjadi 0° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan 5.12° dan berubah menjadi 11.07° . Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari 0.72° menjadi -0.05° .



Gambar 4.2. Respon frekuensi saat generator BTGE.GEN.01 lepas dari sistem

Pada gambar 4.2 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada detik ke 5. Frekuensi sistem terus menurun hingga 59,8188 % hal ini dikarenakan hilangnya suplai daya dari generator BTGE.GEN01 sedangkan jumlah beban tetap sehingga kebutuhan daya tidak tercukupi. Oleh karena itu perlu dilakukan *load shedding* untuk mengembalikan kestabilan sistem.



Gambar 4.3. Respon tegangan saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem

Pada gambar 4.3 dapat dilihat respon tegangan sistem saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada detik ke 5. Setelah terjadi gangguan tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 79,9979 % hal ini dikarenakan hilangnya suplai daya dari generator BTGE.GEN01 sedangkan jumlah beban tetap.

Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban untuk mengembalikan kestabilan sistem.

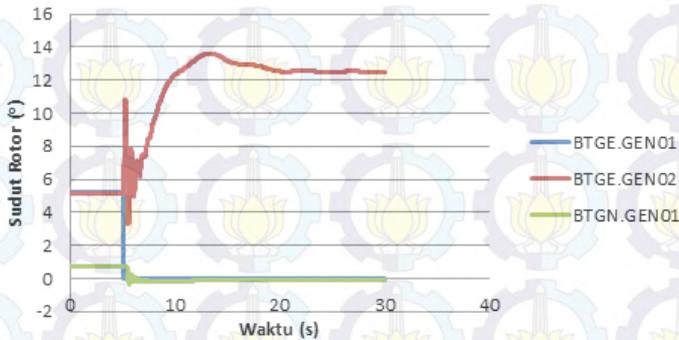
4.4.1.2. Studi kasus Gen Out 1 LS: Generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem ($t=5$ detik) dan diikuti *load shedding*

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika salah satu generator lepas dari sistem yaitu generator BTGE.GEN01 dan diikuti dengan *load shedding*. Pada tugas akhir ini menggunakan *load shedding* tiga tahap berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

Load shedding tahap 1 ($t=5,341$ detik)

Dikarenakan sistem tidak stabil sehingga dilakukan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 5,111 Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.4, 4.5 dan 4.6.

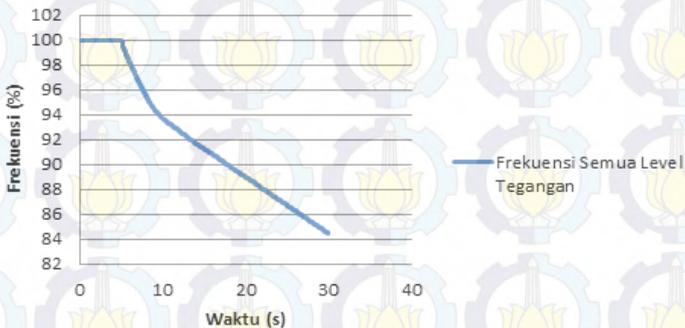
Respon Sudut Rotor



Gambar 4.4. Respon sudut rotor saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1

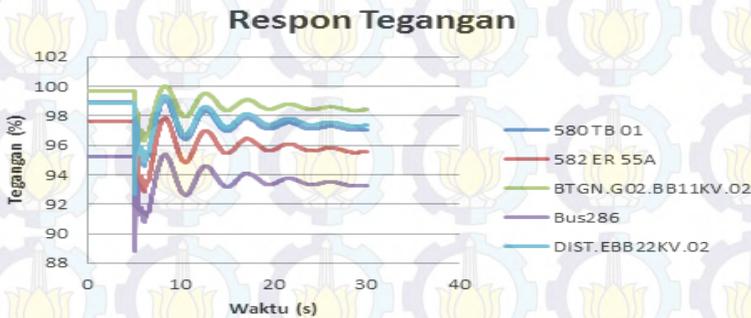
Pada gambar 4.4 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$ dan berubah menjadi 0° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$ dan berubah menjadi $12,48^\circ$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari $0,72^\circ$ menjadi $-0,1^\circ$.

Respon Frekuensi



Gambar 4.5. Respon frekuensi saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1

Pada gambar 4.5 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada detik ke 5 dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, maka *load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat frekuensi sistem turun hingga mencapai 98.83%. *Load shedding* tahap 1 dilakukan pada detik ke 5,341 dengan melepas beban sebesar 10% dari total beban yaitu sebesar 10,9804 MW. Namun dari hasil *load shedding* tahap 1 kondisi sistem masih tidak stabil. Frekuensi sistem terus menurun hingga 84,9219 % hal ini dikarenakan daya dari pembangkit tidak cukup. Oleh karena itu perlu dilakukan *load shedding* tahap 2 untuk mengembalikan kestabilan sistem.



Gambar 4.6. Respon tegangan saat generator BTGE.Gen01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1

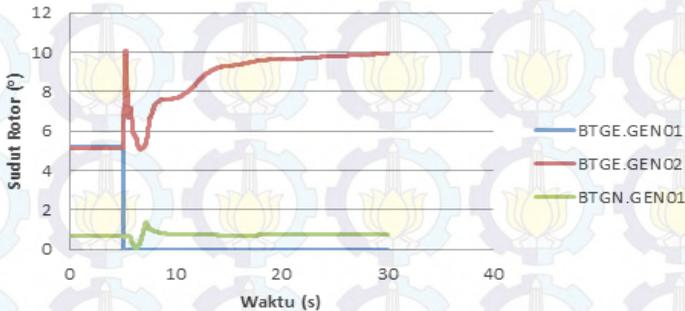
Pada gambar 4.6. dapat dilihat respon tegangan sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 5,111. Setelah dilakukan *load shedding* ternyata tegangan masih belum stabil, tegangan bus menurun hingga 89,3568%.

Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban tahap 2 untuk mengembalikan kestabilan sistem.

Load shedding tahap 2 (t=6,072 detik)

Dikarenakan sistem tidak stabil setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 sehingga dilakukan *load shedding* tahap 2 pada detik ke 5,222. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.7, 4.8, 4.9, dan 4.10.

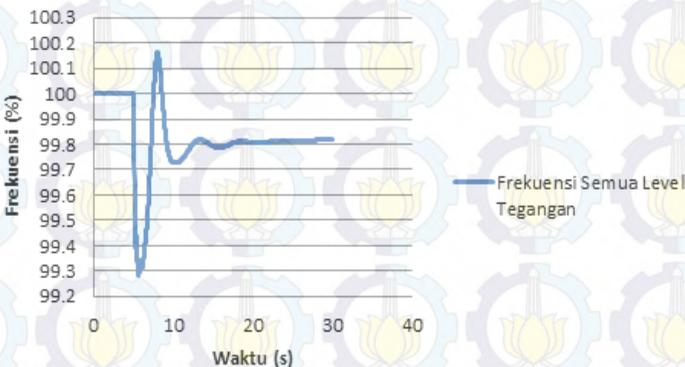
Respon Sudut Rotor



Gambar 4.7. Respon sudut rotor saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 dan tahap 2

Pada gambar 4.7 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5.23° dan berubah menjadi 0° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan 5.12° dan berubah menjadi 9.91° . Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari 0.72° menjadi 0.73° .

Respon Frekuensi



Gambar 4.8. Respon frekuensi saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 dan tahap 2

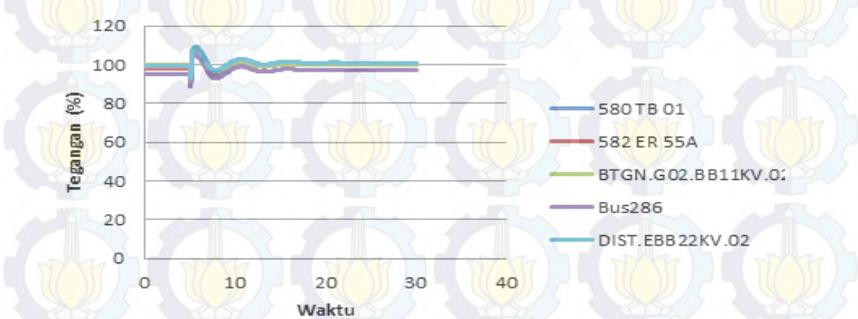
Perbandingan Frekuensi Sebelum & Sesudah LS



Gambar 4.9. Respon frekuensi sistem sebelum dan setelah dilakukan *load shedding*

Pada gambar 4.8 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada detik ke 5 diikuti dengan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 5,111 dan *load shedding* tahap 2 pada detik 6.072 dengan melepas beban sebesar 15% dari total beban yaitu sebesar 16,35 MW. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 2, frekuensi sistem menurun hingga 99,3258% dan kembali stabil pada 99.8152%. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem sudah stabil.

Respon Tegangan



Gambar 4.10. Respon tegangan saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem pada dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 dan tahap 2

Pada gambar 4.10 dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan. Sebelum gangguan frekuensi berada pada tegangan 98,9402% dan level terendah didapatkan turun hingga 91,0213% sedangkan untuk level tertinggi didapatkan 106,507%. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 2 maka pada level setiap tegangan bus akan stabil pada 100,956%. Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan sistem masih dalam batas standar PLN (+5% dan -10%) sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil.

Berikut ini tabel rekapitulasi *load shedding* untuk kasus Gen Out 1 LS:

Tabel 4.3. Tabel rekapitulasi kuantitas beban untuk *load shedding* kasus Gen Out 1 LS

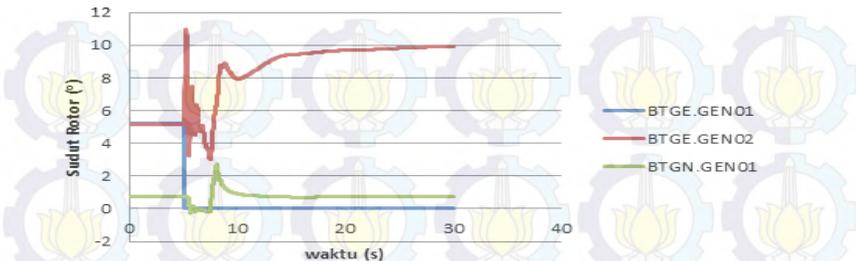
| Load shedding | Beban (MW) | Beban (%) | t (detik) |
|-----------------------|----------------|---------------|-----------|
| Load shedding tahap 1 | 10,9804 | 10.135 | 5,111 |
| Load shedding tahap 2 | 16,35 | 15.09 | 5,222 |
| Total | 27,3304 | 25.225 | |

Dari hasil analisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap ke 2. Kuantitas beban yang harus dilepas adalah 27.3304 MW atau 25.225% dari total beban.

4.4.1.3. Studi kasus Gen Out 1 : Generator BTGE.GEN01 lepas dari system (t=5 detik) dan mekanisme load shedding menggunakan status.

Mekanisme pelepasan beban menggunakan status dilakukan dengan membuka CB setelah 0,2 detik setelah terjadi gangguan berupa lepasnya generator dari system. Pelepasan beban yang dilakukan dilakukan secara langsung, sedangkan pada pelepasan beban menggunakan frekuensi, pelepasan beban dilakukan secara bertahap. Pada kasus ini akan dilihat respon sudut rotor pada tiap generator, selain itu juga akan dilihat respon frekuensi dan tegangan pada setiap level tegangan bus, Sehingga dapat diketahui apakah system sudah dalam keadaan stabil atau dalam keadaan tidak stabil. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.11, 4.12, dan 4.13.

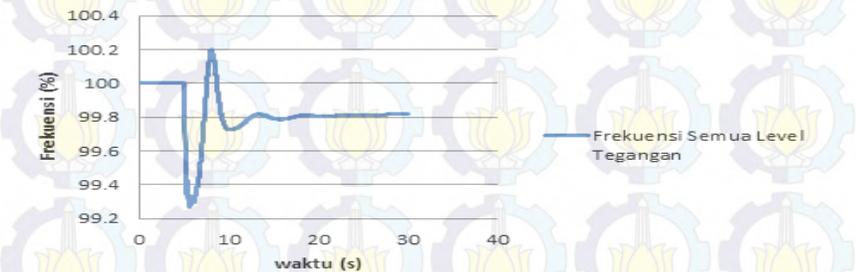
Respon Sudut Rotor



Gambar 4.11. Respon sudut rotor saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

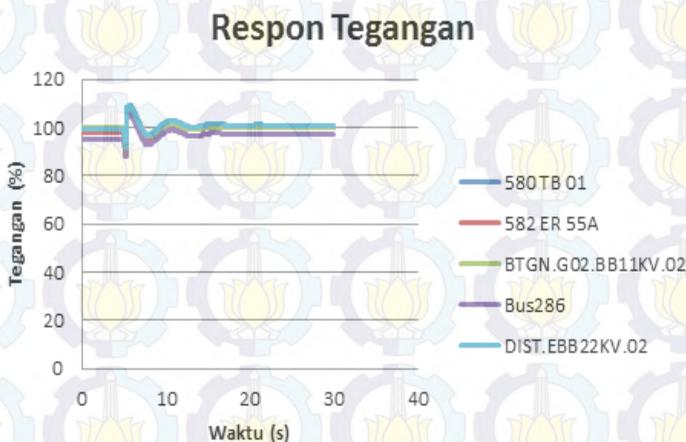
Pada gambar 4.11 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01 setelah dilakukan pelapasan beban berdasarkan status. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan $5,23^{\circ}$ dan berubah menjadi 0° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^{\circ}$ dan berubah menjadi $9,91^{\circ}$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari $0,72^{\circ}$ menjadi $0,73^{\circ}$. Pelepasan beban akan dilakukan secara langsung setelah 0,2 detik. Maka pelepasan dengan menggunakan status dilakukan pada detik ke 5,2. Beban yang dilepas pada kasus ini adalah 27,3304 MW.

Respon Frekuensi



Gambar 4.12. Respon frekuensi saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

Pada gambar 4.12 dapat dilihat respon frekuensi semua level tegangan bus. Sebelum gangguan system berada pada frekuensi 100 %, kemudian setelah 5 detik generator BTGE.GEN01 lepas dari system dan diikuti dengan *load shedding* menggunakan mekanisme status sebesar 5,2 detik. Titik terendah dari nilai frekuensi tersebut adalah 99,324 %. Sedangkan nilai tertinggi dicapai pada nilai 100,157 Hz dan system akan kembali stabil pada frekuensi 99,8155 %.



Gambar 4.13. Respon tegangan saat generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

Pada gambar 4.13 dapat dilihat respon tegangan semua level tegangan bus dengan menggunakan mekanisme pelepasan beban berdasarkan status. Maka nilai sebelum gangguan adalah 98,9403%. Setelah generator lepas dari system nilai terendah dicapai pada 91,0213% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 107,204%. Sistem akan kembali stabil pada nilai 100,956%.

4.4.1.4. Studi kasus Gen Out 2 : Generator BTGN.GEN01 lepas dari system ($t=5$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika generator BTGN.GEN01 lepas. Lepasnya generator BTGN.GEN01 disimulasikan pada detik ke 5. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.14, 4.15, dan 4.16.

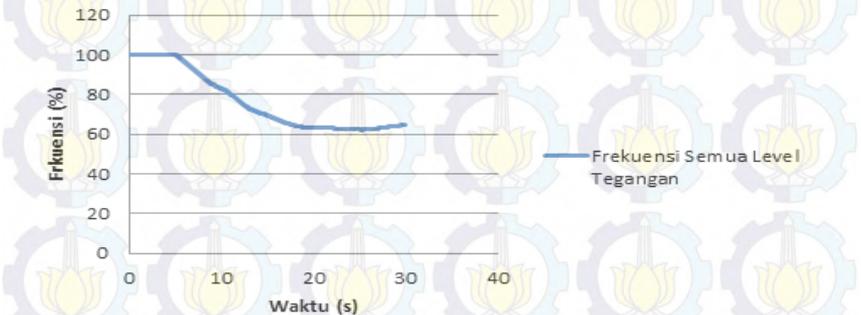
Respon Sudut Rotor



Gambar 4.14. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem

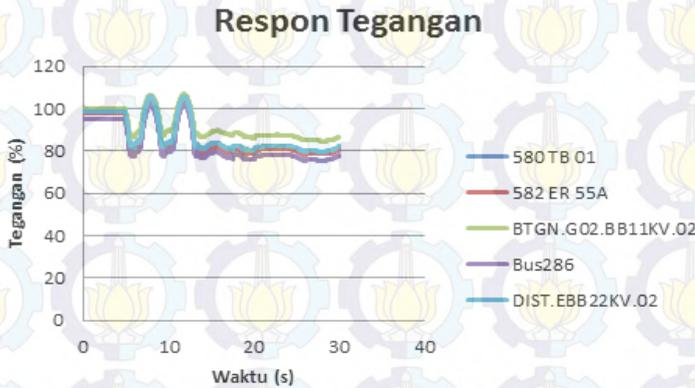
Pada gambar 4.14. dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01 setelah dilakukan pelapasan beban berdasarkan status. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5.23° dan berubah menjadi 13.34° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan 5.12° dan berubah menjadi 13.36° . Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari 0.72° menjadi 0° .

Respon Frekuensi



Gambar 4.15. Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem

Pada gambar 4.15 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem pada detik ke 5. Frekuensi sistem terus menurun hingga nilai terendah yaitu 62,5211% dikarenakan hilangnya suplai daya dari generator BTGE.GEN01 sedangkan jumlah beban tetap sehingga kebutuhan daya tidak tercukupi. Oleh karena itu perlu dilakukan *load shedding* untuk mengembalikan kestabilan sistem.



Gambar 4.16. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem

Pada gambar 4.16 dapat dilihat respon tegangan sistem saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem pada detik ke 5. Setelah terjadi gangguan tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 75,9447% hal ini dikarenakan hilangnya suplai daya dari generator BTGE.GEN01 sedangkan jumlah beban tetap.

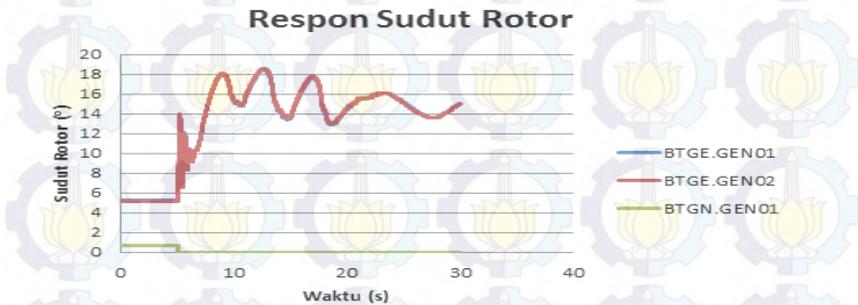
Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban untuk mengembalikan kestabilan sistem.

4.4.1.5. Studi kasus Gen Out 2 LS: Generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem ($t=5$ detik) dan diikuti *load shedding*

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika salah satu generator lepas dari sistem yaitu generator BTGE.GEN01 diikuti dengan *load shedding*. Pada tugas akhir ini menggunakan *load shedding* tiga tahap berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

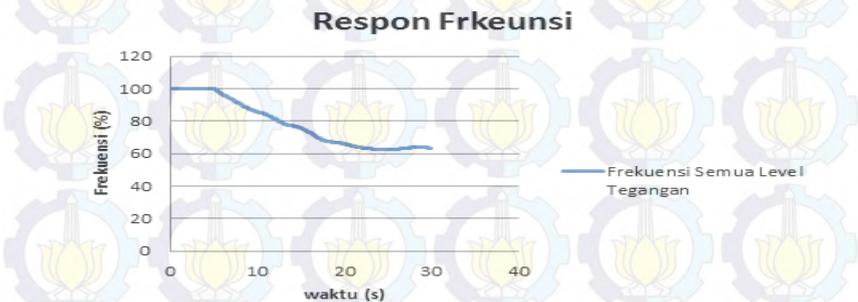
Load shedding tahap 1 (t=5.401detik)

Dikarenakan sistem tidak stabil sehingga dilakukan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 2.441. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.17, 4.18 dan 4.19.



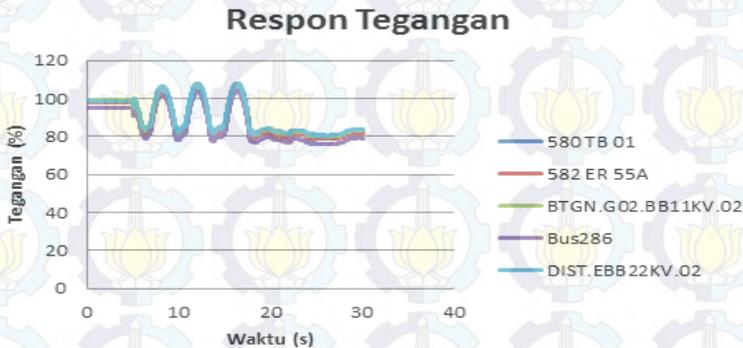
Gambar 4.17. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1

Pada gambar 4.17 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01 setelah dilakukan pelapasan beban berdasarkan status. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5.23° dan berubah menjadi 15.03° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan 5.12° dan berubah menjadi 14.99° . Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari 0.72° menjadi 0° .



Gambar 4.18. Respon frekuensi saat BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1

Pada gambar 4.18 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem pada detik ke 5 dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, maka *load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat frekuensi sistem turun hingga mencapai 98.83% dan ditambah delay 6 *cycle* atau 0.12 detik. Frekuensi sistem mencapai 98.83% (sebelum *load shedding*) pada detik ke 5,281 ditambah dengan delay 0.12 detik sehingga *load shedding* tahap 1 dilakukan pada detik ke 5,401 dengan melepas beban sebesar 10% dari total beban yaitu sebesar 10,9804 MW. Namun dari hasil *load shedding* tahap 1 kondisi sistem masih tidak stabil. Frekuensi sistem menurun hingga 63,8949 % .Oleh karena itu perlu dilakukan *load shedding* tahap 2 untuk mengembalikan kestabilan sistem.



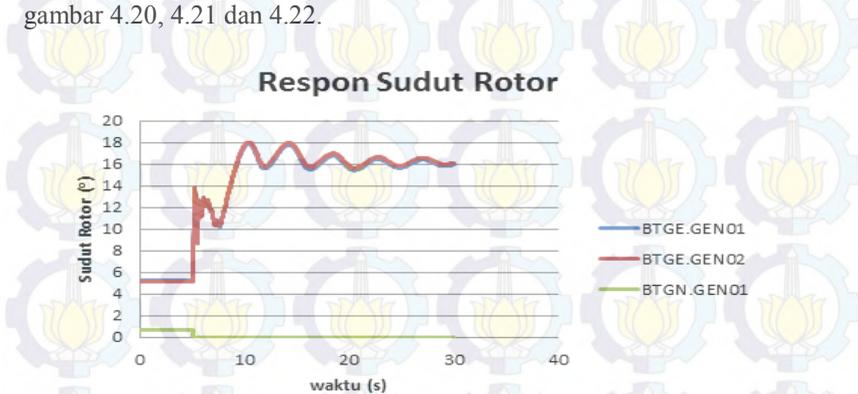
Gambar 4.19. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1

Pada gambar 4.19 dapat dilihat respon tegangan sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 5,401. Setelah dilakukan *load shedding* ternyata tegangan masih belum stabil, tegangan bus didapatkan nilai terendah hingga 76,2575%.

Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban tahap 2 untuk mengembalikan kestabilan sistem.

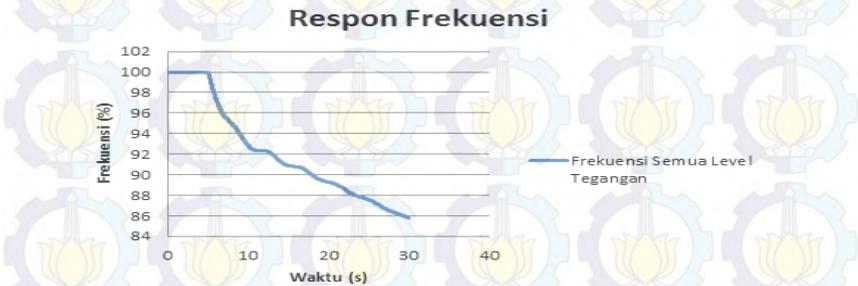
Load shedding tahap 2 (t=5.593 detik)

Dikarenakan sistem tidak stabil sehingga dilakukan *load shedding* tahap 2 pada detik ke 5,024 . Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.20, 4.21 dan 4.22.



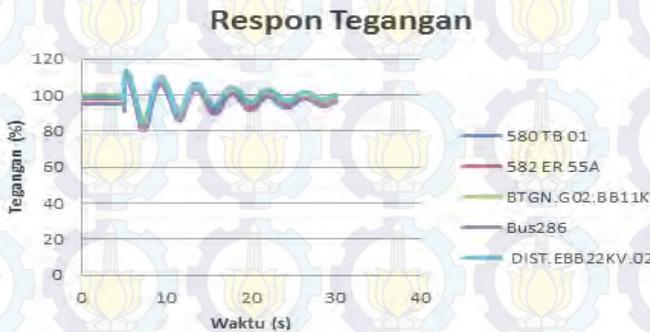
Gambar 4.20. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 dan 2

Pada gambar 4.20 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01 setelah dilakukan pelapasan beban berdasarkan status. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5.23° dan berubah menjadi 15.95° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$ dan berubah menjadi 16.12° . Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari $0,72^\circ$ menjadi 0° .



Gambar 4.21 Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 dan 2

Pada gambar 4.21 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator BTGE.GEN02 lepas dari sistem pada detik ke 5 dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 5,012 dan tahap 2 pada detik ke 5,024. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, maka *load shedding* tahap 2 dilakukan pada saat frekuensi sistem turun hingga mencapai 98.16% dan ditambah delay 6 cycle atau 0.12 detik. Sehingga *load shedding* tahap 2 dilakukan pada detik ke 5,593 dengan melepas beban sebesar 15% dari total beban yaitu sebesar 16, 35 MW. Namun dari hasil *load shedding* tahap 2 kondisi sistem masih tidak stabil. Frekuensi sistem terus menurun hingga 86,0995 % dan dapat dipastikan akan turun terus menerus. Oleh karena itu perlu dilakukan *load shedding* tahap 3 untuk mengembalikan kestabilan sistem.



Gambar 4.22. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01. lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 dan 2

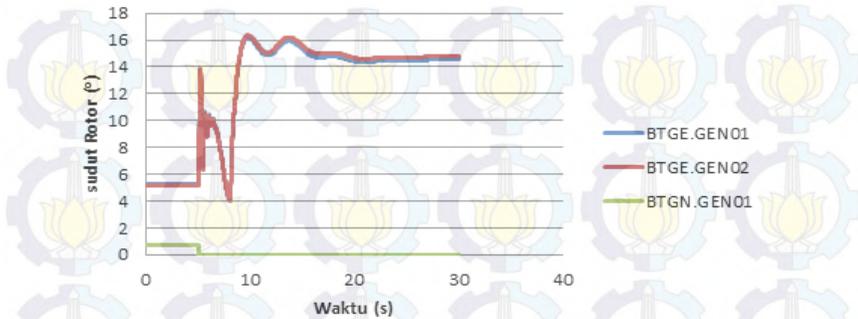
Pada gambar 4.22 dapat dilihat respon tegangan sistem setelah *load shedding* tahap 2 pada detik ke 5,593. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 2 ternyata tegangan masih belum stabil, tegangan bus generator menurun hingga 83,4395 %.

Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban tahap 3 untuk mengembalikan kestabilan sistem.

Load shedding tahap 3 (t=5,945 detik)

Dikarenakan sistem tidak stabil sehingga dilakukan *load shedding* tahap 2 pada detik ke 5,221. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.23, 4.24, 4.25 ,dan 4.26.

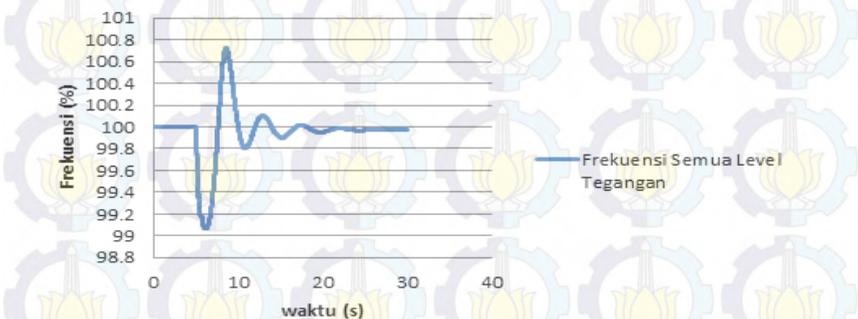
Respon Sudut Rotor



Gambar 4.23. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1,2 dan 3

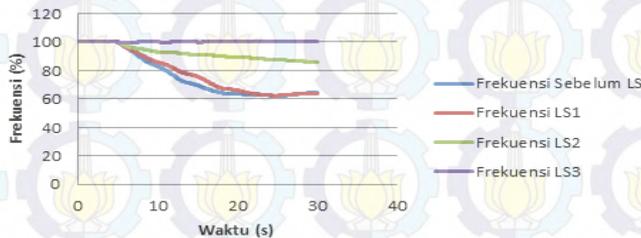
Pada gambar 4.23 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01 setelah dilakukan pelapasan beban berdasarkan status. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5.23° dan berubah menjadi 14.53° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan 5.12° dan berubah menjadi 14.75° . Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari 0.72° menjadi 0° .

Respon Frekuensi



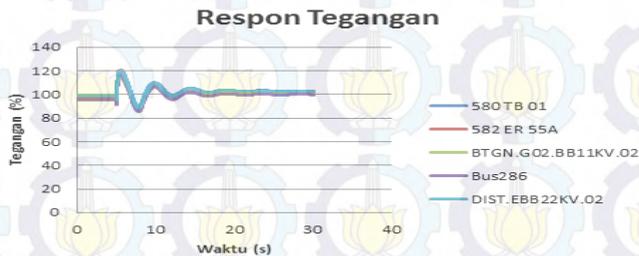
Gambar 4.24. Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1, 2 dan 3

Perbandingan Frekuensi Sebelum & Sesudah LS



Gambar 4.25. Respon frekuensi sistem sebelum dan setelah dilakukan *load shedding*

Pada gambar 4.24 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem pada detik ke 5 dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1, 2 dan 3. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, maka *load shedding* tahap 3 dilakukan pada saat frekuensi sistem turun hingga mencapai 97.5%. Frekuensi sistem mencapai 97.5% (setelah *load shedding* 2) pada detik ke 5,593 sehingga *load shedding* tahap 3 dilakukan pada detik ke 5,945 dengan melepas beban sebesar 25% dari total beban yaitu sebesar 27.414 MW. Namun dari hasil *load shedding* tahap 1 kondisi sistem masih tidak stabil. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 3, frekuensi sistem menurun hingga 99,2166% dan kembali stabil pada 99,9761%. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem sudah stabil.



Gambar 4.26. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1, 2 dan 3

Pada gambar 4.26 dapat dilihat respon tegangan sistem setelah *load shedding* tahap 3 pada detik ke 5,221. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 3 didapatkan nilai terendah pada 91,4496% dan kemudian kembali stabil pada tegangan 102,869%. Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan sistem masih dalam batas standar PLN (+5% dan -10%) sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil.

Berikut ini tabel rekapitulasi *load shedding* untuk kasus Gen Out 2 LS:

Tabel 4.4. Tabel rekapitulasi kuantitas beban untuk *load shedding* kasus Gen Out 2 LS

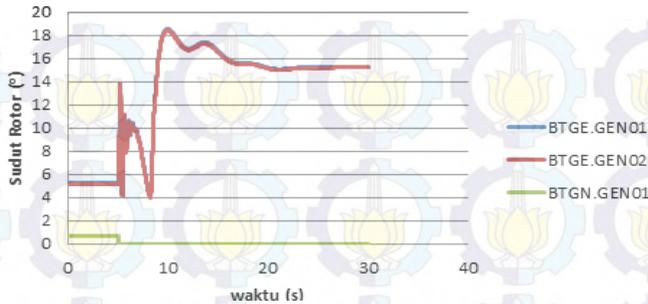
| Load shedding | Beban (MW) | Beban (%) | t (detik) |
|-----------------------|------------|-----------|-----------|
| Load shedding tahap 1 | 10,9804 | 10.135 | 5,012 |
| Load shedding tahap 2 | 16,35 | 15.09 | 5,024 |
| Load shedding tahap 3 | 27,414 | 25 | 5,221 |
| Total | 54,7444 | 50,225 | |

Dari hasil analisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus generator BTGE.GEN01 lepas dari sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap ke 3. Kuantitas beban yang harus dilepas adalah 54,7444 MW atau 50,225% dari total beban.

4.4.1.6. Studi kasus Gen Out 2 : Generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem ($t=5$ detik) dan mekanisme *load shedding* menggunakan status.

Mekanisme pelepasan beban menggunakan status dilakukan dengan membuka CB setelah 0,2 detik setelah terjadi gangguan berupa lepasnya generator dari sistem. Pelepasan beban yang dilakukan dilakukan secara langsung, sedangkan pada pelepasan beban menggunakan frekuensi, pelepasan beban dilakukan secara bertahap. Pada kasus ini akan dilihat respon sudut rotor pada tiap generator, selain itu juga akan dilihat respon frekuensi dan tegangan pada setiap level tegangan bus, Sehingga dapat diketahui apakah sistem sudah dalam keadaan stabil atau dalam keadaan tidak stabil. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.27, 4.28, dan 4.29.

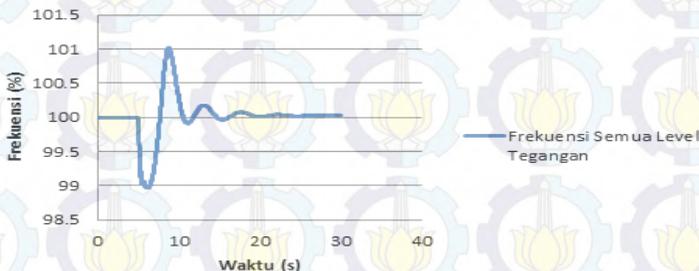
Respon Sudut Rotor



Gambar 4.27. Respon sudut rotor saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

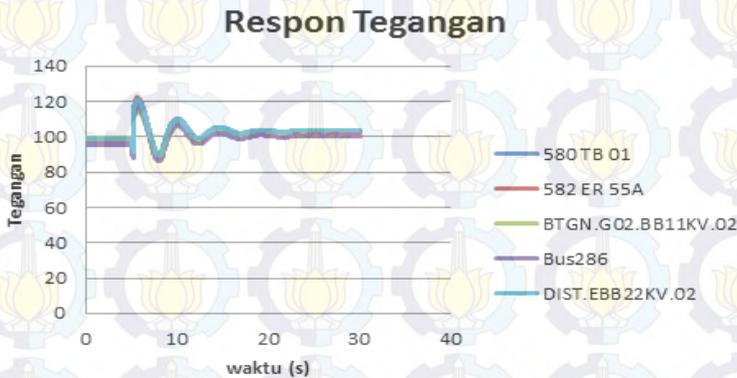
Pada gambar 4.27 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01 setelah dilakukan pelapasan beban berdasarkan status. Sudut rotor generator BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5.23° dan berubah menjadi 15.29° . Pada sudut rotor BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan 5.12° dan berubah menjadi 15.23° . Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor berubah dari $0,72^{\circ}$ menjadi 0° . Pelepasan beban akan dilakukan secara langsung setelah 0,2 detik. Maka pelepasan dengan menggunakan status dilakukan pada detik ke 5,2. Beban yang dilepas pada kasus ini adalah 54,7444 MW.

Respon Frekuensi



Gambar 4.28. Respon frekuensi saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

Pada gambar 4.28 dapat dilihat respon frekuensi semua level tegangan bus. Sebelum gangguan system berada pada frekuensi 100%, kemudian setelah 5 detik generator BTGN.GEN01 lepas dari system dan diikuti dengan *load shedding* menggunakan mekanisme status sebesar 5,2 detik. Titik terendah dari nilai frekuensi tersebut adalah 99,1271%. Sedangkan nilai tertinggi dicapai pada nilai 100,93 Hz dan system akan kembali stabil pada frekuensi 100,027%.



Gambar 4.29. Respon tegangan saat generator BTGN.GEN01 lepas dari sistem dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

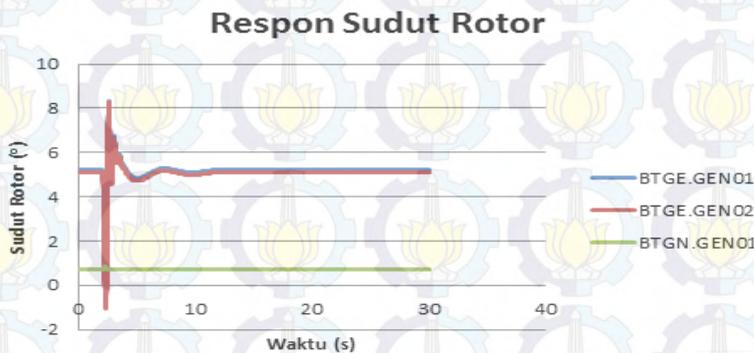
Pada gambar 4.29 dapat dilihat respon tegangan semua level tegangan bus dengan menggunakan mekanisme pelepasan beban berdasarkan status. Maka nilai sebelum gangguan adalah 98,9403%. Setelah generator lepas dari system nilai terendah dicapai pada 97,9475% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 117,97%. Sistem akan kembali stabil pada nilai 103,181%.

4.4.2. Simulasi kestabilan transien untuk kasus *short circuit*

Pada sub bab ini akan dianalisis hasil simulasi untuk kasus *Short circuit*.

4.4.2.1. Studi Kasus SC 0.4 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 0.4 kV bus25 ($t=2$ detik), CB T5.GS51.CB6KV.03 open ($t=2.3$ detik)

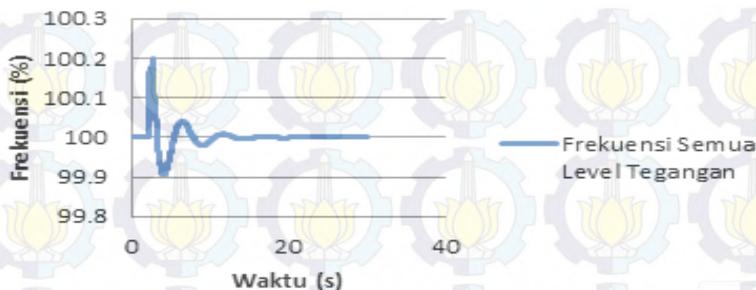
Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 25 yang mewakili profil tegangan 0.4 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2.3 CB T5.GS51.CB6KV.03 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.30, 4.31, dan 4.32.



Gambar 4.30. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus bus25 dan CB T5.GS51.CB6KV.03 open untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.30 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan $5,23^\circ$ dan saat terjadi gangguan turun hingga $-0,67^\circ$. Setelah CB T5.GS51.CB6KV.03 open pada detik ke 2.3 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $5,23^\circ$. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$ dan saat terjadi gangguan turun hingga $-0,67^\circ$. Setelah CB T5.GS51.CB6KV.03 open pada detik ke 2.3 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $5,12^\circ$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan $0,72^\circ$, setelah CB T5.GS51.CB6KV.03 open pada detik ke 2,3 sudut mencapai *steady state* pada $0,72^\circ$.

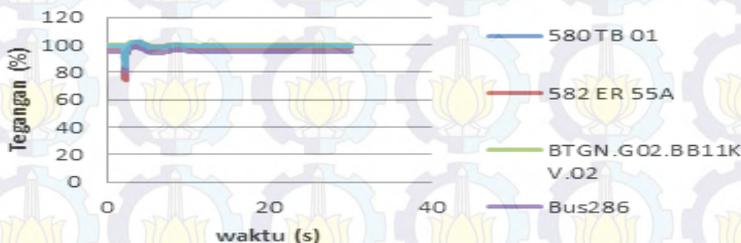
Respon Frekuensi



Gambar 4.31. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus bus25 dan CB T5.GS51.CB6KV.03 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.31 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus 25. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus bus25 pada detik ke 2, frekuensi sistem naik mencapai 100.189 %. Hal ini diakibatkan karena lepasnya CB 304 mengakibatkan hilangnya beban yang berada di bawah bus T5.GS51.CB6KV.03 sehingga besarnya daya pembangkitan lebih besar dari daya yang dibutuhkan beban. Frekuensi mencapai kondisi *steady state* pada 100%. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem sudah stabil.

Respon Tegangan



Gambar 4.32. Respon respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus bus25 dan CB T5.GS51.CB6KV.03 *open* untuk mengatasi gangguan

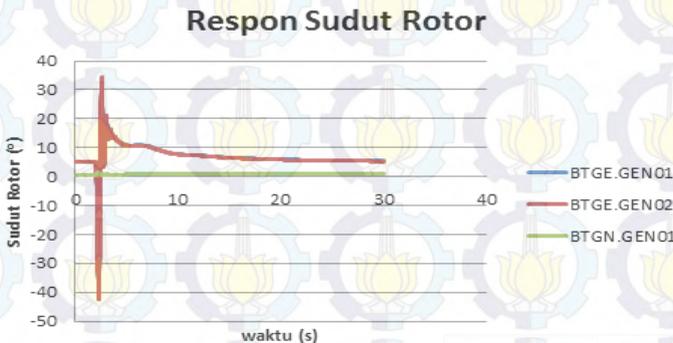
Pada gambar 4.32 dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan. Nilai sebelum gangguan adalah 98,9403%. Setelah terjadi hubung singkat 3 fasa pada bus 25 maka didapatkan nilai terendah dicapai pada 78,3169% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 100,52%. Kemudian sistem akan kembali stabil pada nilai 98,9388%.

Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan sistem masih dalam batas standar PLN (+5% dan -10%) sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil.

Dari hasil analisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus hubung singkat pada bus 25.

4.4.2.2. Studi Kasus SC 6,3 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus SGI ($t=2$ detik), CB HVSG 3 open ($t=2.3$ detik)

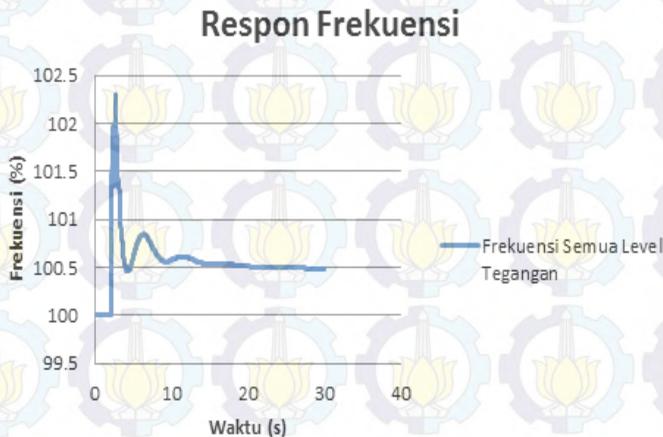
Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus SGI mewakili profil tegangan 6,3 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2.3 CB HVSG 3 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.33, 4.34, dan 4.35.



Gambar 4.33. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus SGI dan CB HVSG 3 open untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.33 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5,23°, saat terjadi gangguan

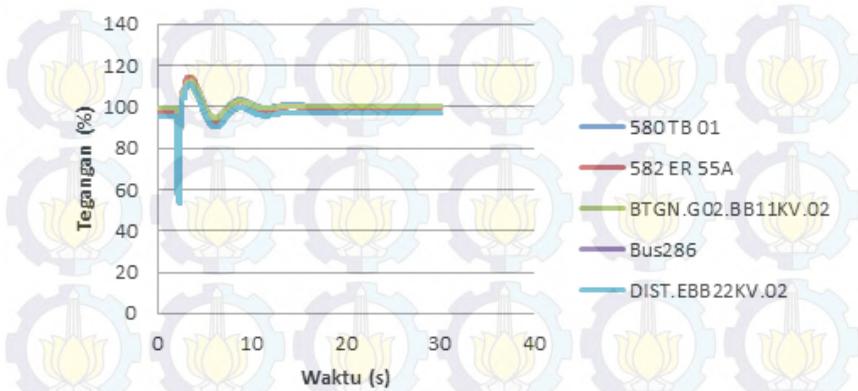
turun hingga $-40,97^\circ$ dan nilai tertinggi hingga $33,22^\circ$. Setelah CB HVSG 3 *open* pada detik ke 2,3 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $5,4^\circ$. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $-40,97^\circ$ dan mencapai nilai tertinggi hingga $33,22^\circ$. Setelah CB HVSG 3 *open* pada detik ke 2,3 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $5,28^\circ$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan $0,72^\circ$, setelah CB HVSG 3 *open* pada detik ke 2,3 sudut mencapai *steady state* pada $0,77^\circ$.



Gambar 4.34. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus SG1 dan CB HVSG 3 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.34 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus SG1. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus SG1 pada detik ke 2, frekuensi sistem naik mencapai 102.172 % . Hal ini diakibatkan karena lepasnya CB HVSG 3 mengakibatkan hilangnya beban yang berada di bawah bus SG1 sehingga besarnya daya pembangkitan lebih besar dari daya yang dibutuhkan beban. Frekuensi mencapai kondisi *steady state* pada 100.492%. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem sudah stabil.

Respon Tegangan



Gambar 4.35. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus SG1 dan CB HVSG 3 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.35. dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan Nilai sebelum gangguan adalah 98,9403. Setelah terjadi hubung singkat 3 fasa pada bus 25 maka didapatkan nilai terendah dicapai pada 58,4357% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 110,625%. Kemudian sistem akan kembali stabil pada nilai 96,7756%.

Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan sistem masih dalam batas standar PLN (+5% dan -10%) sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil.

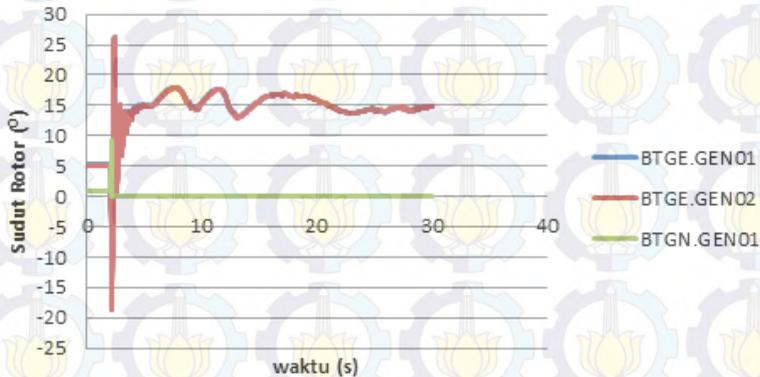
Dari hasil analisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus hubung singkat pada bus SG1.

4.4.2.3. Studi Kasus SC 11 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 11 kV BTGN.G01.BB11kV.02 ($t=2$ detik), CB BTGN.CB11KV.G01.01 open ($t=2.1$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 yang mewakili profil tegangan 11 kV dan berada tepat di bawah generator. Gangguan hubung singkat

disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2.1 BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.36, 4.37, dan 4.38.

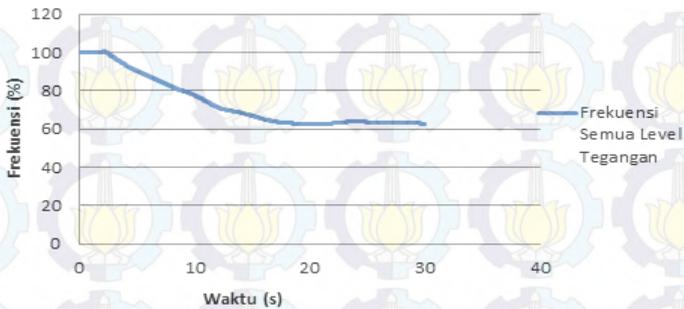
Respon Sudut Rotor



Gambar 4.36. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan.

Pada gambar 4.36 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5,23°, saat terjadi gangguan turun hingga -17,98° dan nilai tertinggi hingga 25,79°. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.1 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada 14,82°. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan 5,12°, saat terjadi gangguan turun hingga -17,98° dan mencapai nilai tertinggi hingga 25,79°. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.1 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada 14,8°. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan 0,72°, saat terjadi gangguan sudut rotor naik hingga 9,28° dan setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2,1 sudut rotor mencapai *steady state* pada 0°.

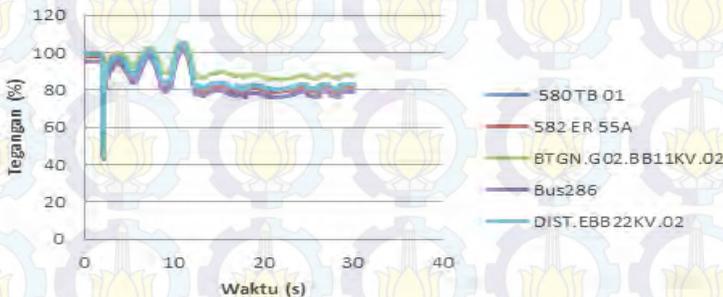
Respon Frekuensi



Gambar 4.37. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan.

Pada gambar 4.37 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus BTGN.G01.BB11kV.02. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 pada detik ke 2. Frekuensi sistem terus menurun hingga 62.8217% hal ini dikarenakan hilangnya suplai daya dari generator BTGN.GEN01 sedangkan jumlah beban tetap sehingga kebutuhan daya tidak tercukupi. Oleh karena itu perlu dilakukan *load shedding* untuk mengembalikan kestabilan sistem.

Respon Tegangan



Gambar 4.38. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan bus BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan.

Pada gambar 4.38 dapat dilihat respon tegangan sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 pada detik ke 2. Setelah terjadi gangguan tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 46,7882% kemudian akan kembali *steady state* pada 82,9997% hal ini dikarenakan hilangnya suplai daya dari generator BTGN.GEN01 sedangkan jumlah beban tetap.

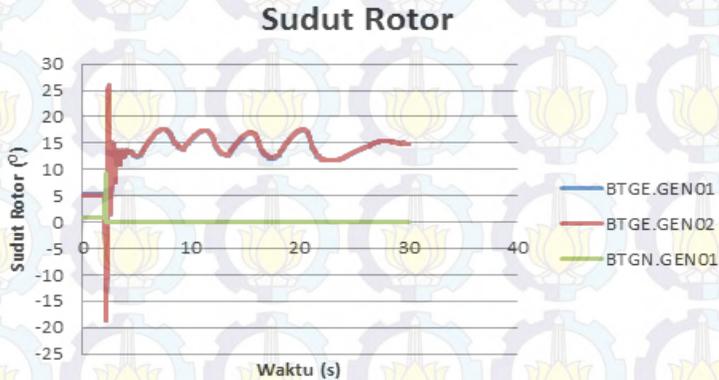
Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban untuk mengembalikan kestabilan sistem.

4.4.2.4. Studi Kasus SC 11 kV LS1: Hubung singkat 3 fasa pada bus 11 kV BTGN.G01.BB11kV.02 ($t=2$ detik), CB BTGN.CB11KV.G01.01 open ($t=2.1$ detik) diikuti load shedding

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 yang mewakili profil tegangan 11 kV dan berada tepat di bawah generator. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan pada detik ke 2.1 BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan kemudian diikuti dengan *load shedding*. Pada tugas akhir ini akan menggunakan *load shedding* tiga tahap berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

Load shedding tahap 1 (t=2,312 detik)

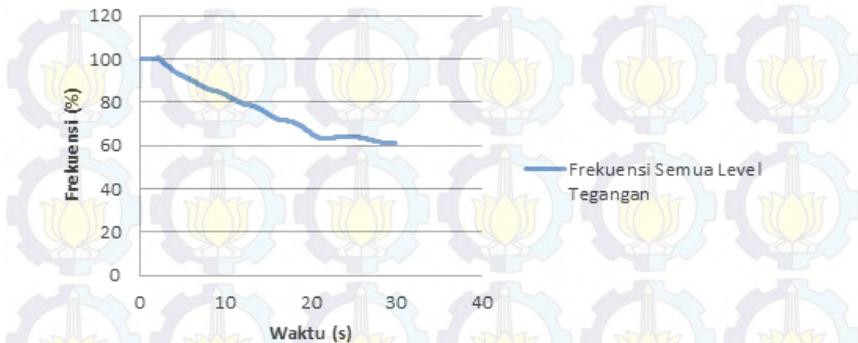
Dikarenakan sistem tidak stabil setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 sehingga dilakukan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 2,312. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.39, 4.40, dan 4.41.



Gambar 4.39. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1

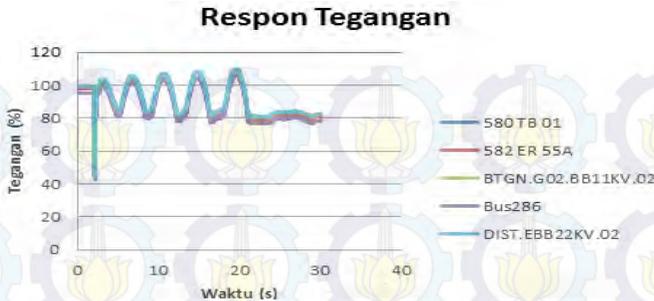
Pada gambar 4.39 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5,23°, saat terjadi gangguan turun hingga -17,98° dan nilai tertinggi hingga 25,97°. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.1 sudut rotor beresilasi pada 14,94°. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan 5,12°, saat terjadi gangguan turun hingga -17,98° dan mencapai nilai tertinggi hingga 25,97°. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.1 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada 14,8°. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan 0,72°, saat terjadi gangguan sudut rotor naik hingga 9,28 ° dan setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2,1 sudut rotor mencapai *steady state* pada 0°.

Respon Frekuensi



Gambar 4.40. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1

Pada gambar 4.40 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 pada detik ke 2 dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, maka *load shedding* tahap 1 dilakukan pada saat frekuensi sistem turun hingga mencapai 98.83% dan ditambah delay 6 *cycle* atau 0.12 detik. Frekuensi sistem mencapai 98.83% pada detik ke 2,312 ditambah dengan delay 0.12 detik sehingga *load shedding* tahap 1 dilakukan pada detik ke 2,312 dengan melepas beban sebesar 10% dari total beban yaitu sebesar 10,9804 MW. Namun dari hasil *load shedding* tahap 1 kondisi sistem masih tidak stabil. Frekuensi sistem terus menurun hingga 61.3475% dan dapat dipastikan akan turun terus menerus. Oleh karena itu perlu dilakukan *load shedding* tahap 2 untuk mengembalikan kestabilan sistem.

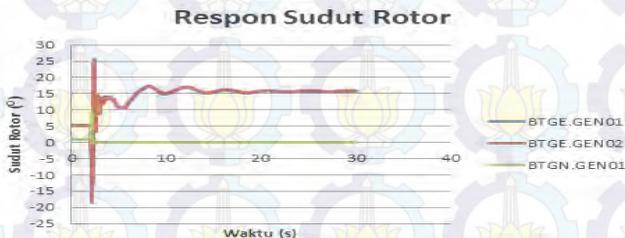


Gambar 4.41. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1

Pada gambar 4.41 dapat dilihat respon tegangan sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 pada detik ke 2 dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 2,312. Setelah dilakukan *load shedding* ternyata tegangan masih belum stabil, tegangan bus menurun hingga 46,7882 % dan *steady state* pada 82.5731%. Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban tahap 2 untuk mengembalikan kestabilan sistem.

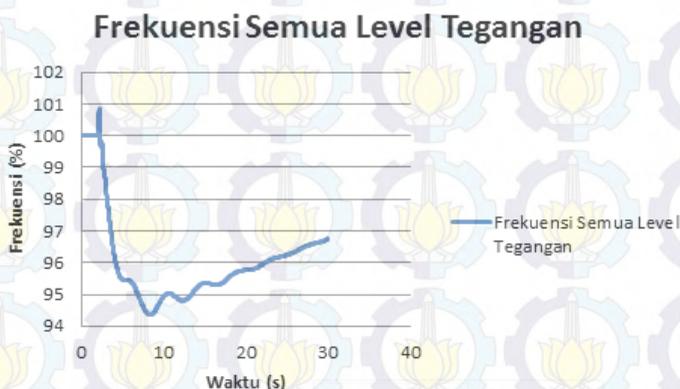
Load shedding tahap 2 (t=2,324 detik)

Dikarenakan sistem tidak stabil setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 sehingga dilakukan *load shedding* tahap 2 pada detik ke 2,324. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.42, 4.43 dan 4.44.



Gambar 4.42. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1 dan tahap 2

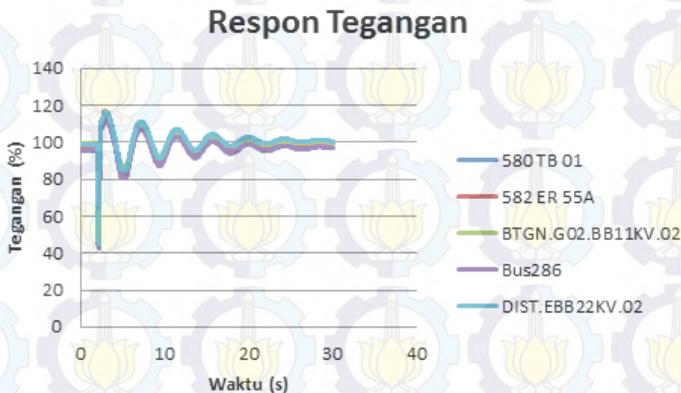
Pada gambar 4.42 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan $5,23^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $-17,98^\circ$ dan nilai tertinggi hingga $25,56^\circ$. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.1 sudut rotor beresiliasi dan mencapai *steady state* pada $15,66^\circ$. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $-17,98^\circ$ dan mencapai nilai tertinggi hingga $25,56^\circ$. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.1 sudut rotor beresiliasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $14,84^\circ$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan $0,72^\circ$, saat terjadi gangguan sudut rotor naik hingga $9,28^\circ$ dan setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2,1 sudut rotor mencapai *steady state* pada 0° .



Gambar 4.43. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1 dan tahap 2

Pada gambar 4.43 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11KV.02 pada detik ke 2 dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 2,312 dan tahap 2 pada detik ke 2,324. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, maka *load shedding* tahap 2 dilakukan pada saat frekuensi sistem turun hingga mencapai 98.16% dan ditambah delay 6 *cycle* atau 0.12 detik. Sehingga *load*

shedding tahap 2 dilakukan pada detik ke 2,324 dengan melepas beban sebesar 15% dari total beban yaitu sebesar 16,35 MW. Namun dari hasil *load shedding* tahap 2 kondisi sistem masih tidak stabil. Frekuensi sistem menurun hingga 94,5877 % , Oleh karena itu perlu dilakukan *load shedding* tahap 3 untuk mengembalikan kestabilan sistem.



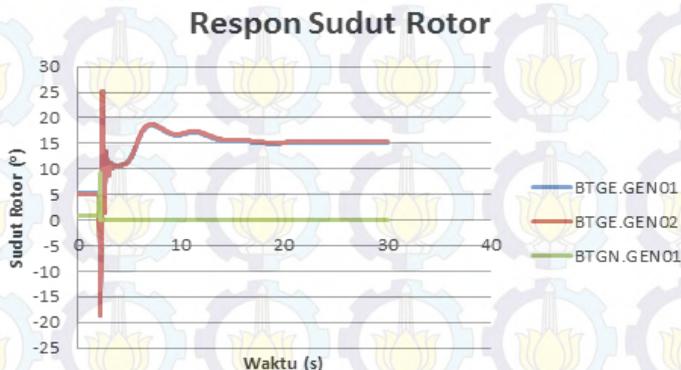
Gambar 4.44. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1 dan tahap 2

Pada gambar 4.44 dapat dilihat respon tegangan sistem setelah *load shedding* tahap 2 pada detik ke 2,324. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 2 ternyata tegangan masih belum stabil, tegangan bus generator menurun hingga 46,7248 %.

Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban tahap 3 untuk mengembalikan kestabilan sistem.

Load shedding tahap 3 (t=2,336 detik)

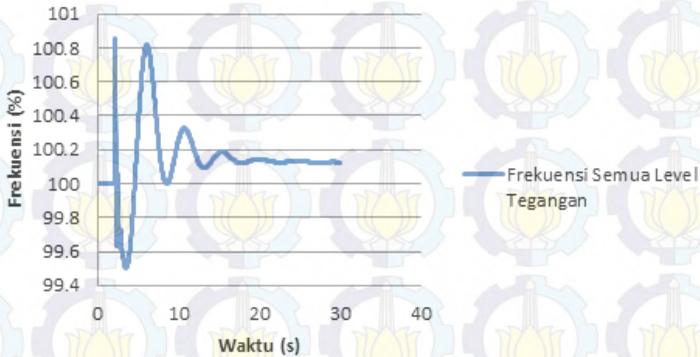
Dikarenakan sistem tidak stabil setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 dan tahap 2 sehingga dilakukan *load shedding* tahap 3 pada detik ke 2,336. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.45, 4.46 4.47, dan 4.48.



Gambar 4.45. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1, tahap 2 dan tahap 3

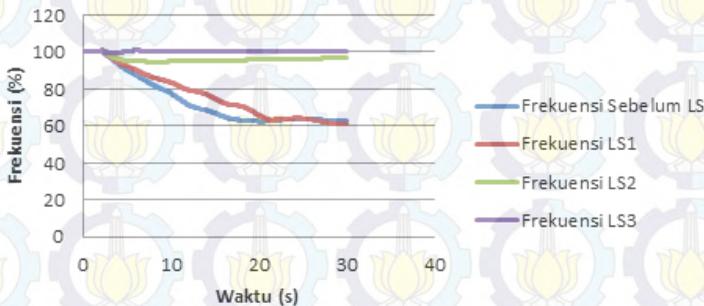
Pada gambar 4.45 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan $5,23^{\circ}$, saat terjadi gangguan turun hingga $-17,98^{\circ}$ dan nilai tertinggi hingga $25,1^{\circ}$. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.1 sudut rotor beresilasi dan mencapai *steady state* pada $15,02^{\circ}$. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^{\circ}$, saat terjadi gangguan turun hingga $-17,98^{\circ}$ dan mencapai nilai tertinggi hingga $25,1^{\circ}$. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.1 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $15,26^{\circ}$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan $0,72^{\circ}$, saat terjadi gangguan sudut rotor naik hingga $9,28^{\circ}$ dan setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2,1 sudut rotor mencapai *steady state* pada 0° .

Respon Frekuensi



Gambar 4.46. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1, tahap 2 dan tahap 3

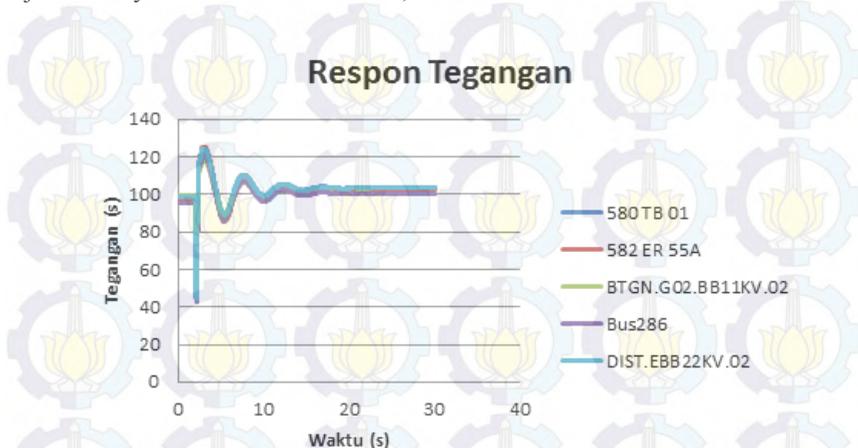
Perbandingan Frekuensi Sebelum & Sesudah LS



Gambar 4.47. Respon frekuensi sistem sebelum dan setelah dilakukan *load shedding*

Pada gambar 4.46 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 pada detik ke 2 dan diikuti dengan *load*

shedding tahap 1, 2 dan 3. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, maka *load shedding* tahap 3 dilakukan pada saat frekuensi sistem turun hingga mencapai 97.5%. Frekuensi sistem mencapai 97.5% (setelah *load shedding* 2) pada detik ke 2,312 sehingga *load shedding* tahap 3 dilakukan pada detik ke 2,324 dengan melepas beban sebesar 25% dari total beban yaitu sebesar 27.414 MW. Namun dari hasil *load shedding* tahap 2 kondisi sistem masih tidak stabil. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 3, frekuensi sistem menurun hingga 99,5713 % dan kembali stabil pada 100,125%. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem sudah stabil.



Gambar 4.48. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan diikuti *load shedding* tahap 1, tahap 2 dan tahap 3

Pada gambar 4.48 dapat dilihat respon tegangan sistem setelah *load shedding* tahap 3 pada detik ke 2,336. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 3 didapatkan nilai terendah pada 45,5272% dan kemudian kembali stabil pada tegangan 103,305%. Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan sistem masih dalam batas standar PLN (+5% dan -10%) sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil.

Berikut ini tabel rekapitulasi *load shedding* untuk kasus SC 11 kV LS:

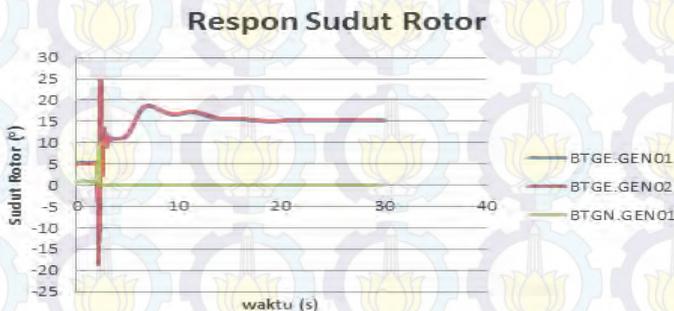
Tabel 4.5. Tabel rekapitulasi kuantitas beban untuk *load shedding* kasus SC 11 kV LS

| Load shedding | Beban (MW) | Beban (%) | t (detik) |
|-----------------------|------------|-----------|-----------|
| Load shedding tahap 1 | 10,9804 | 10.135 | 2,312 |
| Load shedding tahap 2 | 16,35 | 15.09 | 2,324 |
| Load shedding tahap 3 | 27,414 | 25 | 2,336 |
| Total | 54,7444 | 50,225 | |

Dari hasil analisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus hubung singkat 3 fasa pada bus 11 kV setelah dilakukan *load shedding* tahap ke 3. Kuantitas beban yang harus dilepas adalah 54,7444 MW atau 50,225% dari total beban.

4.4.2.5. Studi Kasus SC 11 kV LS1: Hubung singkat 3 fasa pada bus 11 kV BTGN.G01.BB11kV.02 ($t=2$ detik), CB BTGN.CB11KV.G01.01 open ($t=2.2$ detik) menggunakan status

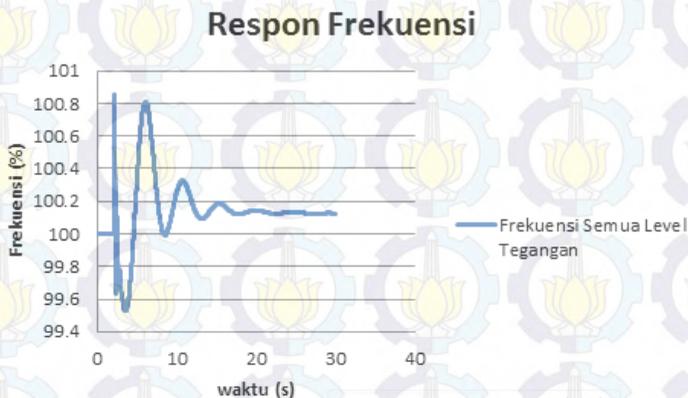
Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.49, 4.50 , dan 4.51.



Gambar 4.49. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB

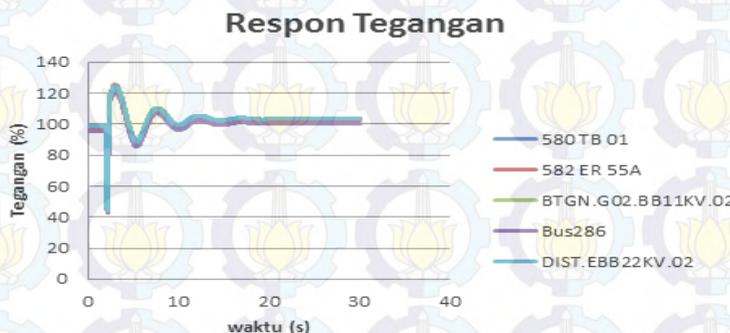
BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

Pada gambar 4.49 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01 setelah dilakukan pelapasan beban berdasarkan status. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan $5,23^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $-17,98^\circ$ dan nilai tertinggi hingga $24,37^\circ$. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.2 sudut rotor beresilasi dan mencapai *steady state* pada $15,02^\circ$. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $-17,98^\circ$ dan mencapai nilai tertinggi hingga $24,37^\circ$. Setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2.2 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $15,26^\circ$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan $0,72^\circ$, saat terjadi gangguan sudut rotor naik hingga $9,28^\circ$ dan setelah CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* pada detik ke 2,2 sudut rotor mencapai *steady state* pada 0° . Pelepasan beban akan dilakukan secara langsung setelah 0,2 detik. Maka pelepasan dengan menggunakan status dilakukan pada detik ke 5,2. Beban yang dilepas pada kasus ini adalah 27,3304 MW.



Gambar 4.50. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

Pada gambar 4.50 dapat dilihat respon frekuensi semua level tegangan bus. Sebelum gangguan system berada pada frekuensi 100%, kemudian setelah 2 detik terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11KV.02 dan diikuti dengan *load shedding* menggunakan mekanisme status sebesar 2,2 detik. Titik terendah dari nilai frekuensi tersebut adalah 99,612%. Sedangkan nilai tertinggi dicapai pada nilai 100,713 Hz dan system akan kembali stabil pada frekuensi 100,125%.

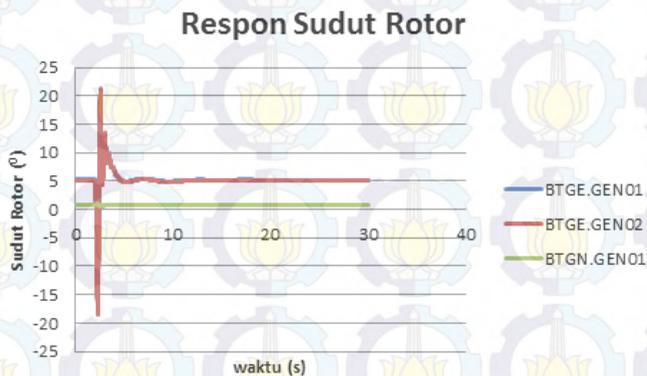


Gambar 4.51. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus BTGN.G01.BB11kV.02 dan CB BTGN.CB11KV.G01.01 *open* untuk mengatasi gangguan dan dilanjutkan dengan mekanisme *load shedding* menggunakan status

Pada gambar 4.51 dapat dilihat respon tegangan semua level tegangan bus dengan menggunakan mekanisme pelepasan beban berdasarkan status. Maka nilai sebelum gangguan adalah 98,9403%. Setelah generator lepas dari system nilai terendah dicapai pada 45,5891% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 123,227. Sistem akan kembali stabil pada nilai 103,359%.

4.4.2.6. Studi Kasus SC 22 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 22 kV DIST.EBB22KV.02 ($t=2$ detik), CB DIST.CB70KVE.05 open ($t=2.3$ detik)

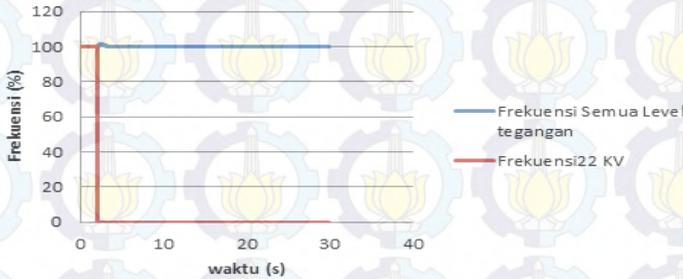
Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus DIST.EBB22KV.02 yang mewakili profil tegangan 22 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2.3 DIST.CB70KVE.05 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.52, 4.53, dan 4.54.



Gambar 4.52. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus DIST.EBB22KV.02 dan CB DIST.CB70KVE.05 open untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.52 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan $5,23^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $-17,77^\circ$ dan mencapai nilai tertinggi hingga $20,56^\circ$. Setelah CB DIST.CB70KVE.05 open pada detik ke 2.3 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $5,18^\circ$. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $-17,77^\circ$ dan mencapai nilai tertinggi hingga $20,56^\circ$. Setelah CB DIST.CB70KVE.05 open pada detik ke 2.3 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $5,07^\circ$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan $0,72^\circ$, setelah CB DIST.CB70KVE.05 open pada detik ke 2,3 sudut mencapai *steady state* pada $0,72^\circ$.

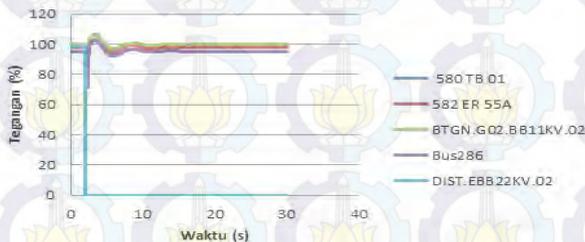
Respon Frekuensi



Gambar 4.53. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus DIST.EBB22KV.02 dan CB DIST.CB70KVE.05 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.53 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus DIST.EBB22KV.02. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus DIST.EBB22KV.02 pada detik ke 2, frekuensi sistem mencapai *steady state pada* 100.059 %. Sedangkan frekuensi pada bus 22 kv turun drastic menjadi nol, Hal ini diakibatkan karena lepasnya CB DIST.CB70KVE.05 sehingga mengakibatkan hilangnya daya yang disuplai menuju bus 22 kv. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem sudah stabil.

Respon Tegangan



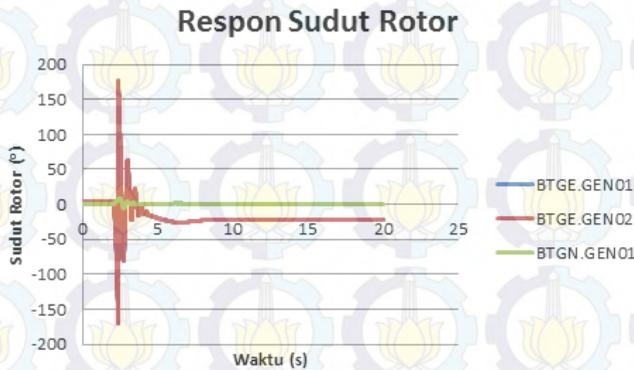
Gambar 4.54. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus DIST.EBB22KV.02 dan CB DIST.CB70KVE.05 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.54 dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan. Pada level tegangan selain 22 kv, nilai tegangan dalam keadaan stabil, namun pada level tegangan 22 KV nilai tegangan turun sampai nol setelah terjadi hubung singkat. Hal ini dikarenakan hilangnya suplay daya yang menuju bus 22 KV. Tegangan system selain level tegangan 22 KV berada pada nilai yang masih diizinkan dalam keadaan stabil pada nilai 99,7195% dan tidak perlu dilakukan *load shedding*.

Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan sistem masih dalam batas standar PLN (+5% dan -10%) sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil.

4.4.2.7. Studi Kasus SC 70 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 70 kV 580 TB 02 ($t=2$ detik), CB T5.CB70KV.06 *open* ($t=2.3$ detik)

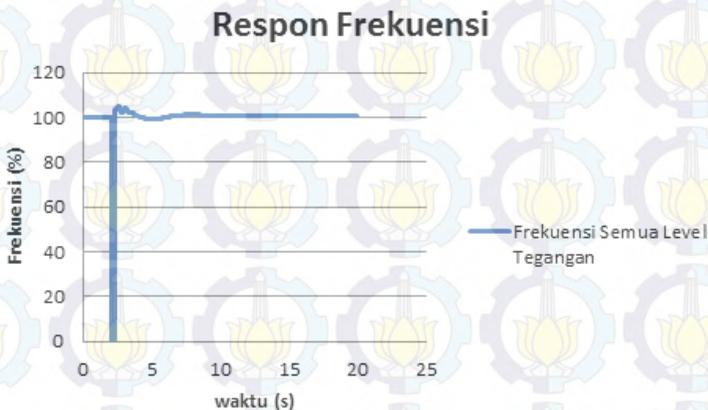
Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 580 TB 02 yang mewakili profil tegangan 70 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2.3 T5.CB70KV.06 *open* untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.55, 4.56, dan 4.57.



Gambar 4.55. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 580 TB 02 dan CB T5.CB70KV.06 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.55 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan 5,23°, saat terjadi gangguan turun

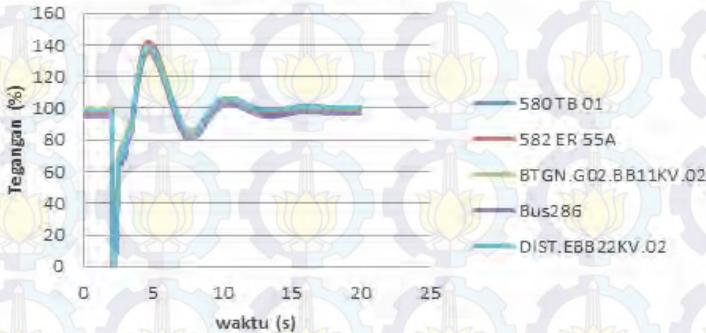
hingga $-170,47^\circ$ dan mencapai nilai tertinggi hingga $177,29^\circ$. Setelah CB T5.CB70KV.06 *open* pada detik ke 2.3 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $-23,14^\circ$. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $5,12^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $-170,47^\circ$ dan mencapai nilai tertinggi hingga $170,29^\circ$. Setelah CB T5.CB70KV.06 *open* pada detik ke 2.3 sudut rotor beresilasi dan mencapai kondisi *steady state* pada $-23,25^\circ$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan $0,72^\circ$, setelah CB T5.CB70KV.06 *open* pada detik ke 2,3 sudut mencapai *steady state* pada $0,77^\circ$.



Gambar 4.56. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 580 TB 02 dan CB T5.CB70KV.06 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.56 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus 580 TB 02. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus 580 TB 02 pada detik ke 2, frekuensi sistem mencapai *steady state* pada 100.544 %. Sedangkan frekuensi system setelah terjadi gangguan hubung singkat sesaat bernilai nol kemudian kembali lagi dalam keadaan *steady state*. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem sudah stabil.

Respon Tegangan



Gambar 4.57. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 580 TB 02 dan CB T5.CB70KV.06 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.57 dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan. Pada setiap level tegangan nilai akan turun setelah terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada level tegangan 70 KV, namun setelah CB T5.CB70KV.06 *open* maka nilai tegangan sesaat menjadi 137,571% dan akan kembali *steady state* pada 100,135%. Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan sistem masih dalam batas standar PLN (+5% dan -10%) sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil.

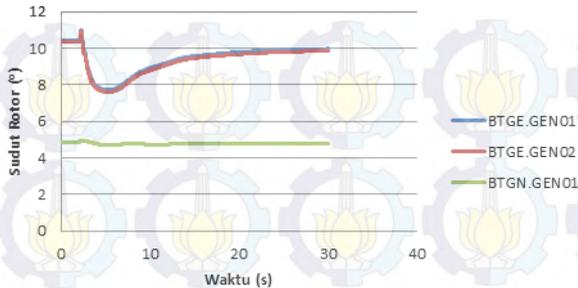
4.4.3. Simulasi kestabilan transien untuk kasus *motor starting*

Pada sub bab ini akan dianalisis hasil simulasi untuk kasus *motor starting*.

4.4.3.1. Studi kasus *Mstart: Motor M532FN11 7,6 MW starting (t=2 detik)*

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika motor M532FN11 *starting* pada detik ke 2. *Starting motor* dilakukan dengan metode DOL (*direct on line*) sehingga simulasi dilakukan dengan menutup *circuit breaker* yang terhubung dengan motor yaitu CB T5.ER54.CB6KV.04 Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.58, 4.59, dan 4.60.

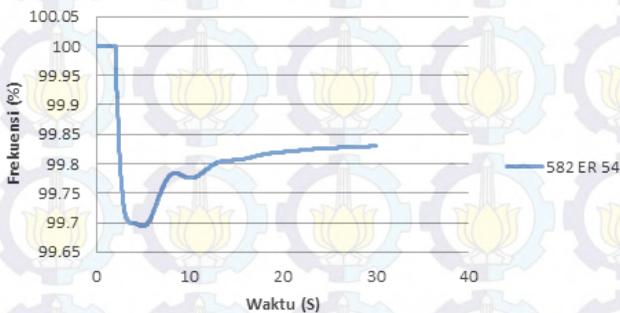
Respon Sudut Rotor



Gambar 4.58. Respon sudut rotor saat motor M532FN11 *starting*

Pada gambar 4.58 dapat dilihat respon sudut rotor generator BTGE.GEN01, BTGE.GEN02, dan BTGN.GEN01. Sudut rotor BTGE.GEN01 saat sebelum gangguan $10,44^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $7,74^\circ$ dan mencapai kondisi *steady state* pada $9,97^\circ$. Sudut rotor pada generator BTGE.GEN02 saat sebelum gangguan $10,33^\circ$, saat terjadi gangguan turun hingga $7,74^\circ$ dan mencapai kondisi *steady state* pada $9,86^\circ$. Sedangkan untuk generator BTGN.GEN01 sudut rotor saat sebelum gangguan $4,88^\circ$ dan mencapai *steady state* pada $4,77^\circ$.

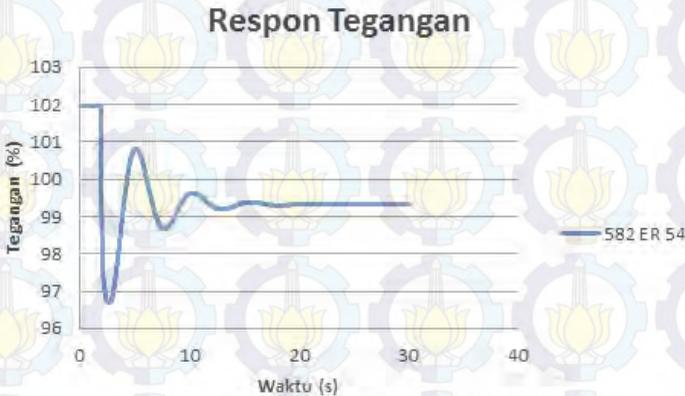
Respon Frekuensi



Gambar 4.59. Respon frekuensi saat motor M532FN11 *starting*

Pada gambar 4.59 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat motor M532FN11 *starting*. Saat motor M532FN11 *starting* pada detik

ke 2, frekuensi sistem turun mencapai 99,6967 % hal ini dikarenakan pada saat motor *starting*, motor menyerap daya yang sangat besar dalam beberapa detik. Frekuensi mencapai kondisi *steady state* pada 99,8297%. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem sudah stabil.



Gambar 4.60. Respon tegangan saat motor M532FN11 *starting*

Pada gambar 4.60 dapat dilihat respon tegangan pada saat motor M532FN11 *starting*. Pada bus 582 ER 54 nilai tegangan sebelum adanya motor *starting* 101,947%. Namun setelah terjadi motor *starting* pada detik ke 2 tegangan akan turun sampai 96,9587% kemudian akan kembali *steady state* pada nilai 99.3167%. Dari hasil analisis di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan sistem masih dalam batas standar PLN (+5% dan -10%) sehingga tegangan sistem dapat dikatakan stabil. Dari hasil analisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus motor *starting*.

BAB 5 PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Pada kasus lepasnya generator mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil. Untuk mengembalikan kestabilan sistem, untuk lepasnya satu generator (BTGE.GEN01) memerlukan pelepasan beban 2 tahap dan untuk lepasnya generator (BTGN.GEN01) memerlukan pelepasan beban 3 tahap.
- Pada kasus hubung singkat di level tegangan 11 kV (bus di bawah generator) mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil. Untuk mengembalikan kestabilan sistem memerlukan pelepasan beban 3 tahap.
- Pada kasus hubung singkat di level tegangan 22 kV, tegangan pada bus utama (22 kV) menurun hingga 0 % dikarenakan tidak adanya daya yang tersalurkan. Sedangkan untuk level tegangan selain (22KV) kembali stabil pada 99,7195%.
- Pada kasus hubung singkat di level tegangan 70 KV, setiap level tegangan nilai akan turun setelah terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada level tegangan 70 KV, namun setelah CB T5.CB70KV.06 *open* maka nilai tegangan sesaat menjadi 137,571% dan akan kembali *steady state* pada 100,135%
- Pada kasus *motor starting* tidak terlalu berpengaruh pada stabilitas sistem, penurunan tegangan terendah pada 96,9587% dan stabil pada 99.3167%.

5.2 SARAN

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

- Untuk kasus lepasnya generator (BTGE.GEN01) diperlukan pelepasan beban hingga 2 tahap dengan melepas 25.225% dari total beban (27,3304MW) untuk menyeimbangkan pembangkitan dan beban
- Untuk kasus lepasnya generator (BTGN.GEN01) diperlukan pelepasan beban hingga 3 tahap dengan melepas 48.075% dari

total beban (54,7444 MW) untuk menyeimbangkan pembangkitan dan beban

- Pada kasus hubung singkat pada level tegangan 11 kV (bus di bawah generator) diperlukan pelepasan beban hingga 3 tahap dengan melepas 48,075% dari total beban (54,7444 MW) untuk menyeimbangkan pembangkitan dan beban
- Pada kasus hubung singkat 11 KV dan 70 K V perlu lebih diperhatikan mengenai kedip tegangan agar tidak merusak peralatan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kundur, Prabha, *“Power System Stability and Control”*, McGraw-Hill Companies Inc, 1994.
- [2] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, *“Definition and Classification of Power System Stability”*, IEEE Transactions on Power System , Vol. 19, No. 2, May 2004.
- [3] Priyandoko, Gigih, *“Analisis Stabilitas Transien di PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang dengan Penambahan Unit Baru Pusri 2B tahun 2013”*. Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2012.
- [4] Stevenson, W.D., John J. Granger, *“Elements of Power System Analysis, 4th Edition”*. McGraw-Hill Companies Inc, 1994.
- [5] Marsudi, Djiteng, *“Operasi Sistem Tenaga Listrik”*, Yogyakarta : Graha Ilmu, 2006.
- [6] IEEE, *“Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants”*, 1987. IEEE Std C37.106-2003 (Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987).
- [7] IEEE, *“Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality”*, 1995. IEEE Std 1159-1995.
- [8] IEEE, *“Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants”*, 1987. IEEE Std C37.106-1987.

RIWAYAT HIDUP



Moh. Riscy Madina, dilahirkan di kota Probolinggo, 2 Januari 1991. Anak kedua dari 4 bersaudara. Pendidikannya berawal dari TK Taruna Dra. Zulaeha pada tahun 1996-1997. Kemudian melanjutkan ke SD Taruna Dra. Zulaeha pada tahun 1997-2003. Setelah itu ia melanjutkan pendidikannya ke SLTP Taruna Dra. Zulaeha pada tahun 2003-2006, setelah lulus ia diterima sebagai murid SMA Taruna Dra. Zulaeha pada tahun 2006 - 2009. Pada tahun yang sama ia masuk ke Jurusan D3 Teknik Elektro-ITS hingga lulus tahun 2012. Kemudian ia

melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya lewat program Lintas Jalur dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga.

