



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**SIMULASI DAN ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN
PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM KELISTRIKAN PT SEMEN
INDONESIA PABRIK ACEH**

David Firdaus
NRP 2214 105 104

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

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**SIMULATION AND TRANSIENT STABILITY ANALYSIS WITH
LOAD SHEDDING AT ELECTRICAL SYSTEM OF PT SEMEN
INDONESIA ACEH PLANT**

David Firdaus
NRP 2214 105 104

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

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2016

**SIMULASI DAN ANALISIS STABILITAS TRANSIEN
DAN PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM
KELISTRIKAN PT SEMEN INDONESIA PABRIK
ACEH**

TUGAS AKHIR

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

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

Ir. Ni Ketut Aryani, MT.
NIP. 196509011991032002

**SURABAYA
JUNI, 2016**

**JURUSAN
TEKNIK ELEKTRO**

SIMULASI DAN ANALISIS STABILITAS TRANSIEN DAN PELEPASAN BEBAN PADA SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN INDONESIA PABRIK ACEH

Nama : David Firdaus
NRP : 2214105104
Dosen Pembimbing 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dosen Pembimbing 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ABSTRAK

PT. Semen Indonesia adalah perusahaan BUMN penghasil semen terbesar dimana akan melakukan perencanaan pembangunan pabrik Semen Aceh. Dalam perencanaannya, sistem kelistrikan pada pabrik Semen Aceh akan menggunakan dua sumber yakni PLN pada sistem kelistrikan alternatif 1 dan Generator 30 MW dan Generator 2x25 MW pada sistem kelistrikan alternatif 2 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 sistem kelistrikan alternatif 2, menunjukkan bahwa pada kasus lepasnya generator mengakibatkan frekuensi sistem tidak stabil. Untuk mengembalikan kestabilan sistem, pada kasus lepasnya generator (841BG02) memerlukan pelepasan beban 2 tahap dengan melepas 25.02% dari total beban (9,97 MW). Saat kasus hubung singkat pada level tegangan 0,4 kV tidak terlalu berpengaruh pada kestabilan meskipun mengakibatkan tegangan turun sesaat dan dapat kembali pada keadaan semula. Selain itu pada kasus hubung singkat dilevel tegangan 6,3 kV, setiap nilai level tegangan akan turun setelah terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada level tegangan 6,3 kV, namun setelah CB5-831MV081 *open* maka nilai tegangan sesaat menjadi 108,359% dan akan kembali *steady state* pada 97,09%. Pada kasus *motor starting*, penurunan tegangan terendah sempat mencapai titik terendah pada 65,79% dan stabil pada 91,456%.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

SIMULATION AND ANALYSIS OF TRANSIENT STABILITY AND LOAD SHEDDING ON ELECTRICAL SYSTEM PT . CEMENT INDONESIA ACEH FACTORY

Name : David Firdaus
NRP : 2214105104
Counsellor Lecturer 1 : Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Counsellor Lecturer 2 : Ir. Ni Ketut Aryani, MT.

ABSTRACT

PT. Indonesia Cement is the largest cement producer state-owned company which will carry out the development planning cement factory in Aceh. In planning, the electrical system in Aceh cement plant will use two sources is PLN on the electrical system of alternative 1 and Generators 30 MW and 2x25 MW Generator on the electrical system of alternative 2 so that the transient stability studies need to be done to determine the stability of the system during a transient interruption. In this thesis focused on the transient stability analysis includes voltage stability, frequency stability and the stability of the generator rotor angle during an outage, the motor starting and short circuit. From the simulation results of alternative electrical system 2, showed that in case of the loss resulting frequency generator system is unstable. To restore the stability of the system, in case of loss of the generator (841BG02) requires two stages of load shedding by removing 25.02 % of the total load (9.97 MW). When the case of short circuit at a voltage level of 0.4 kV was not affecting the stability although the resulting voltage drops momentarily and may return to its original state. Also in the case of a short circuit at the level of the voltage of 6.3 kV, each rated voltage level will drop after three -phase short circuit at a voltage level of 6.3 kV, but after CB5-831MV081 open the instantaneous voltage value of 108.359 % and will be back steady state at 97.09 %. In the case of starting motors , low voltage drop had reached its lowest point at 65.79 % and steady at 91.456 %

Keywords : transient stability, transient disturbances, *Load Shedding*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN

JUDUL	
LEMBAR PERNYATAN KEASLIAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xvii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang Masalah	1
1.2. Permasalahan	1
1.3. Tujuan	2
1.4. Metodologi.....	2
1.5. Sistematika.....	4
1.6. Relevansi.....	4

BAB 2 KESTABILAN TRANSIEN

2.1. Kestabilan Sistem Tenaga	5
2.1.1. Kestabilan Sudut Rotor.....	6
2.1.1.1. Hubungan antara sudut rotor dan daya	6
2.1.1.2. Fenomena Kestabilan	8

2.1.2. Kestabilan Tegangan	9
2.1.3. Kestabilan Frekuensi	10
2.2. Kestabilan Transien.....	10
2.2.1. Hubung Singkat	10
2.2.2. <i>Motor Starting</i>	11
2.2.3. Penambahan Beban secara Tiba-Tiba	11
2.3. Persamaan Ayunan Generator	12
2.4. Sistem Pengoperasian <i>Load Shedding</i>	14
2.4.1. Pelepasan Beban Secara Manual.....	16
2.4.2. Pelepasan Beban Secara Otomatis	16
2.5. Standar yang Digunakan untuk Analisis Kestabilan Transien ...	17
2.5.1. Standar Frekuensi untuk <i>Steam Turbin Generator</i> (IEEE Std C37.106-2003)	17
2.5.2. Standar Tegangan	17
2.5.2. Standar Pelepasan Beban	18

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT.SEMEN TONASA

3.1. Metode Pelaksanaan Studi.....	19
3.2. Sistem Kelistrikan PT.SEMEN ACEH	20
3.3. Data Kelistrikan PT.SEMEN ACEH.....	20
3.3.1. Sistem Pembangkitan.....	20
3.3.2. Sistem Distribusi.....	21
3.3.3. Data Beban.....	23
3.4. Data Kontrol Generator PT.SEMEN ACEH	24

3.4.1. Model Exciter.....	24
3.4.2. Model Governor.....	25

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

4.1. Pemodelan sistem kelistrikan PT.SEMEN ACEH.....	29
4.2. Total pembangkitan dan beban PT.SEMEN ACEH	29
4.3. Studi kasus kestabilan transien	30
4.4. Simulasi dan analisis kestabilan transien	32
4.4.1. Simulasi kestabilan transien untuk kasus <i>short circuit</i> alternatif 1.....	32
4.4.1.1. Studi kasus SC 0.4kV : Hubung Singkat 3 fasa bus 0.4kV bus 831LV081 (t=2 detik), CB1-831LV081 open (t=2.3detik).....	32
4.4.1.2. Studi kasus SC 0.4kV : Hubung Singkat 3 fasa bus 0.4kV bus 831LV082 (t=2 detik), CB1-831LV082 open (t=2.3detik).....	34
4.4.1.3. Studi kasus SC 6.3kV : Hubung Singkat 3 fasa bus 6.3kV bus 831MV081 (t=2 detik), CB5-831MV081 open (t=2.3detik).....	35
4.4.1.4. Studi kasus SC 6.3kV : Hubung Singkat 3 fasa bus 6.3kV bus 831MV082 (t=2 detik), CB5-831MV082 open (t=2.3detik).....	37
4.4.2. Simulasi kestabilan transien untuk kasus <i>motor starting</i> alternatif 1.....	38
4.4.2.1. Studi Kasus <i>M start</i> : Motor 341FN01M01 7,1MW <i>starting</i> (t=2 detik)	38

4.4.3. Simulasi kestabilan transien untuk kasus generator <i>outage</i> alternatif 2.....	40
4.4.3.1. Studi kasus Gen Out 1 : Generator 841BG02 lepas dari sistem (t=2 detik).....	40
4.4.3.2. Studi kasus Gen Out 1 : Generator 841BG02 lepas dari sistem (t=2 detik) dan diikuti <i>Load Shedding</i>	42
4.4.4. Simulasi kestabilan transien untuk kasus <i>short circuit</i> alternatif 2.....	48
4.4.4.1. Studi kasus SC 0.4kV : Hubung Singkat 3 fasa bus 0.4kV bus 831LV081 (t=2 detik), CB1-831LV081 open (t=2.3detik).....	48
4.4.4.2. Studi kasus SC 0.4kV : Hubung Singkat 3 fasa bus 0.4kV bus 831LV082 (t=2 detik), CB1-831LV082 open (t=2.3detik).....	50
4.4.4.3. Studi kasus SC 6.3kV : Hubung Singkat 3 fasa bus 6.3kV bus 831MV081 (t=2 detik), CB5-831MV081 open (t=2.3detik).....	53
4.4.4.4. Studi kasus SC 6.3kV : Hubung Singkat 3 fasa bus 6.3kV bus 831MV082 (t=2 detik), CB5-831MV082 open (t=2.3detik).....	55
4.4.5. Simulasi kestabilan transien untuk kasus <i>motor starting</i> alternatif 2.....	58
4.4.5.1. Studi Kasus <i>M start</i> : Motor 341FN01M01 7,1MW <i>starting</i> (t=2 detik).....	58

BAB 5 PENUTUP

Kesimpulan.....	61
Saran.....	61

DAFTAR PUSTAKA	63
LAMPIRAN (<i>Single Line Diagram</i>)	
BIODATA PENULIS	

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1. Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (60 Hz)	18
Tabel 2.2. Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (50 Hz)	18
Tabel 3.1. Data Kapasitas Pembangkit di PT.SEMEN ACEH.....	20
Tabel 3.2. Data Kapasitas Pembangkit di PT.SEMEN ACEH.....	21
Tabel 3.3. Data Reaktansi Generator PT.SEMEN ACEH.....	21
Tabel 3.4. Data Transformator PT. SEMEN ACEH (2-Winding)	22
Tabel 3.5. Data Transformator PT.SEMEN ACEH (3-Winding)	23
Tabel 3.6. Data Pembebanan PT.SEMEN ACEH	23
Tabel 3.7. Parameter <i>Exciter</i> tipe ST1	24
Tabel 3.8. Parameter <i>Governor</i> tipe 505	25
Tabel 3.9. Parameter <i>Governor</i> tipe 2301	26
Tabel 4.1. Total pembangkitan dan beban di PT. SEMEN ACEH pada sistem kelistrikan alternatif 1	29
Tabel 4.2. Total pembangkitan dan beban di PT. SEMEN ACEH pada sistem kelistrikan alternatif 2	29
Tabel 4.3. Studi kasus kestabilan transien alternatif 1	30
Tabel 4.4. Studi kasus kestabilan transien alternatif 2	31
Tabel 4.5. Tabel rekapitulasi kuantitas beban untuk <i>load shedding</i> kasus Gen Out LS	47

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik	6
Gambar 2.2. Diagram impedansi sistem dua mesin	7
Gambar 2.3. Model ideal sistem dua mesin	7
Gambar 2.4. Diagram <i>Phasor</i> Sistem Dua Mesin	8
Gambar 2.5. Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban	14
Gambar 2.6. Batas Operasi Frekuensi Abnormal untuk <i>Steam Turbin Generator</i>	16
Gambar 2.7. Definisi <i>Voltage Magnitude Event</i> berdasarkan standar IEEE 1159-195	17
Gambar 3.1. Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi.....	19
Gambar 3.2. Diagram blok <i>Exciter</i> Tipe ST1	25
Gambar 3.3. Diagram blok <i>Governor</i> Tipe 505	27
Gambar 3.4. Diagram blok <i>Governor</i> Tipe 2301	28
Gambar 4.1. Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081	33
Gambar 4.2. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	33
Gambar 4.3. Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082	34
Gambar 4.4. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	35
Gambar 4.5. Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081	36
Gambar 4.6. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 dan CB5-831MV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	36

Gambar 4.7. Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082.....	37
Gambar 4.8. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 dan CB5-831MV082 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan.....	38
Gambar 4.9. Respon frekuensi saat <i>motor starting</i> 341FN01M01	39
Gambar 4.10. Respon tegangan bus motor saat <i>motor starting</i> 341FN01M01	39
Gambar 4.11. Respon sudut rotor saat generator 841BG02 lepas dari sistem.....	40
Gambar 4.12. Respon frekuensi saat generator 841BG02 lepas dari sistem	41
Gambar 4.13. Respon tegangan saat generator 841BG02 lepas dari sistem	42
Gambar 4.14. Respon sudut rotor saat generator 841BG02 lepas dari sistem dan diikuti Load Shedding tahap 1	43
Gambar 4.15. Respon frekuensi saat generator 841BG02 lepas dari sistem dan diikuti Load Shedding tahap	43
Gambar 4.16. Respon tegangan saat generator 841BG02 lepas dari sistem dan diikuti Load Shedding tahap 1	44
Gambar 4.17. Respon sudut rotor saat generator 841BG02 lepas dari sistem dan diikuti Load Shedding tahap 2.....	45
Gambar 4.18. Respon frekuensi saat generator 841BG02 lepas dari sistem dan diikuti Load Shedding tahap 2	46
Gambar 4.19. Respon frekuensi sistem sebelum dan setelah dilakukan <i>load shedding</i>	46
Gambar 4.20. Respon tegangan saat generator 841BG02 lepas dari sistem dan diikuti Load Shedding tahap 2	47
Gambar 4.21 Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan.....	48
Gambar 4.22 Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan.....	49

Gambar 4.23. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	50
Gambar 4.24. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082 dan CB1-831LV082 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	51
Gambar 4.25. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082 dan CB1-831LV082 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	51
Gambar 4.26. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082 dan CB1-831LV082 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	52
Gambar 4.27. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 dan CB5-831MV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	53
Gambar 4.28. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 dan CB5-831MV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	54
Gambar 4.29. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 dan CB5-831MV081 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan.....	55
Gambar 4.30. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 dan CB5-831MV082 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	56
Gambar 4.31 Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 dan CB5-831MV082 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	56
Gambar 4.32. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 dan CB5-831MV082 <i>open</i> untuk mengatasi gangguan	57
Gambar 4.33. Respon sudut rotor saat <i>motor starting</i> 341FN01M01	58
Gambar 4.34. Respon frekuensi saat <i>motor starting</i> 341FN01M01	59
Gambar 4.35. Respon tegangan saat <i>motor starting</i> 341FN01M01	59

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PT. Semen Indonesia adalah perusahaan BUMN penghasil semen terbesar di Indonesia. Dalam usaha pemenuhan kebutuhan produksi semen yang terus meningkat, PT. Semen Indonesia telah melakukan perencanaan pembangunan pabrik baru yaitu pabrik Semen Aceh. Dalam perencanaannya, sistem kelistrikan pada pabrik Semen Aceh nantinya akan menggunakan dua sumber yakni dari PLN pada sistem kelistrikan alternatif 1 serta Generator 30MW dan 2x25MW pada sistem kelistrikan alternatif 2. Banyak beban – beban motor dengan konsumsi daya besar yang nantinya akan dipasang pada pabrik. Tentu hal ini perlu di analisa ketika motor – motor tersebut *starting* ataupun terjadi gangguan hubung singkat pada sistem yang dapat menyebabkan gangguan. Untuk memperoleh keandalan dari sistem kelistrikan pabrik PT. Semen Aceh diperlukan pertimbangan skema kelistrikan jika terjadi gangguan hilang kestabilan.

Gangguan merupakan salah satu faktor penyebab ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Gangguan pada sisi suplai dapat menyebabkan generator trip, mengakibatkan sistem pada pabrik tersebut terganggu dan mengakibatkan ketidakseimbangan antara jumlah daya suplai dengan daya beban. Begitu juga dengan gangguan hubung singkat, umumnya menyebabkan daya suplai lebih besar dari daya beban. Pada proses motor *starting* juga mempengaruhi sistem jika motor besar dioperasikan dan mengambil arus *starting* yang besar akan mempengaruhi sistem tersebut.

Beberapa jenis gangguan yang telah disebutkan dapat mengakibatkan sistem keluar dari batas stabil. Agar sistem tenaga listrik yang ada tidak mengalami *collapse* atau pemadaman total, maka sebagian beban yang bekerja harus dilepaskan agar terjadi keseimbangan antara daya yang dibangkitkan dengan kebutuhan beban.

1.2. Permasalahan dan Batasan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pola operasi pada sistem kelistrikan di PT. SEMEN ACEH.
2. Bagaimana respon frekuensi dan tegangan serta sudut rotor di PT. SEMEN ACEH saat dilakukan analisis kestabilan transien.

3. Bagaimana merancang skema *load shedding* yang handal jika diperlukan pada sistem kelistrikan PT. SEMEN ACEH.

Batasan - batasan yang digunakan untuk menganalisis antara lain :

1. Analisis kestabilan transien dilakukan pada PT. Semen Aceh dengan memperhatikan respon tegangan dan frekuensi untuk sistem kelistrikan Alternatif 1 dan respon sudut rotor generator, respon tegangan dan frekuensi untuk sistem kelistrikan Alternatif 2.
2. *Single Line Diagram* (SLD) dan data kelistrikan PT. Semen Aceh yang digunakan berasal dari pihak perusahaan.
3. Perangkat lunak yang digunakan ETAP 12.6.

1.3. Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Tugas Akhir ini adalah :

- 1) Melaksanakan simulasi studi kestabilan transien sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh untuk mendapatkan rekomendasi yang diperlukan sehingga dicapai keandalan serta stabilitas yang layak dan mampu mengatasi setiap gangguan - gangguan yang mungkin terjadi antara lain gangguan lepasnya generator, hubung singkat dan *motor starting*.
- 2) Merancang suatu skema *load shedding* yang handal pada sistem kelistrikan PT. Semen Indonesia Pabrik Aceh untuk pulih dan menjaga beban-beban vital akibat hilangnya pembangkitan secara tiba-tiba dari generator pada sistem jika menyebabkan sistem tidak stabil.

1.4. Metodologi Penelitian

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 ACEH yang meliputi : data generator, 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 PT. SEMEN ACEH serta

memberikan rekomendasi untuk mengatasi gangguan tersebut seperti perlu tidaknya dilakukan load shedding.

1.5. Sistematika Penulisan

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 ACEH

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

BAB IV : Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas data hasil simulasi stabilitas transien pada generator serta bus akibat gangguan generator *outage*, 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 atau Manfaat

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 ACEH.
2. Dapat digunakan sebagai acuan untuk melakukan *load shedding* terhadap sistem kelistrikan PT. SEMEN ACEH.
3. Dapat dijadikan referensi pada penelitian selanjutnya tentang stabilitas transien pada sistem kelistrikan industri.

BAB 2

KESTABILAN TRANSIEN

2.1. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk tetap berada pada kondisi seimbang dalam kondisi operasi normal dan dapat memperoleh kembali kondisi seimbang setelah sistem mengalami gangguan. Sedangkan sebaliknya, ketidakstabilan terjadi ketika sistem tidak dapat memperoleh kondisi seimbang setelah sistem mengalami gangguan [1].

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. Kestabilan generator ini dipengaruhi oleh perubahan dari sudut daya generator.

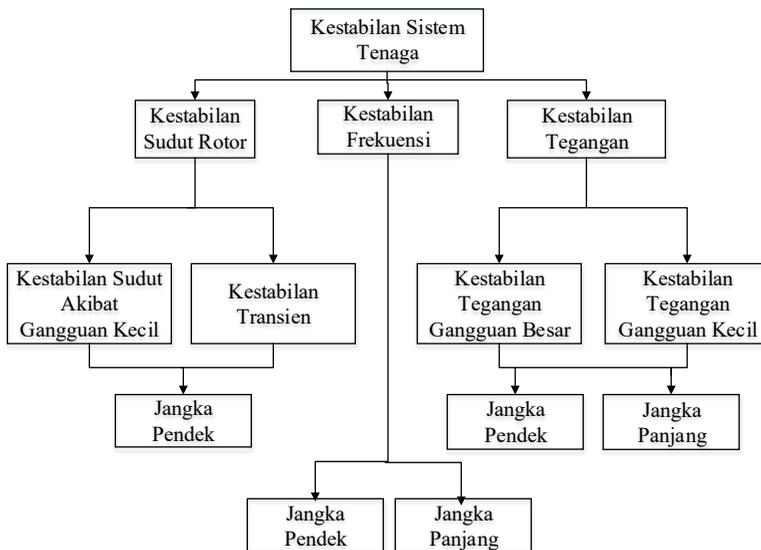
Ketidakstabilan juga dapat terjadi tanpa hilangnya sinkronisasi. Sebagai contoh ketika *starting* motor induksi dimana akan terjadi drop tegangan yang besar sehingga sistem tidak stabil. Dalam hal ini yang menjadi sorotan adalah kestabilan dan pengaturan tegangan.

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 :

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

Pengklasifikasian sistem tenaga secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 2.1 [2].



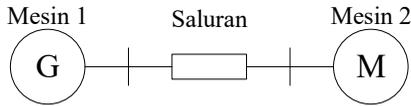
Gambar 2.1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga listrik [2]

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.

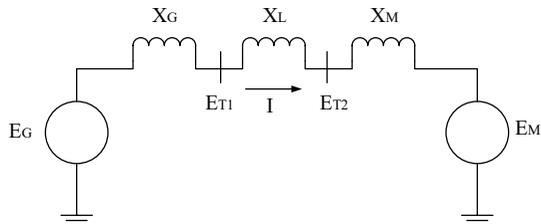


Gambar 2.2. Diagram impedansi sistem dua mesin [1].

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.

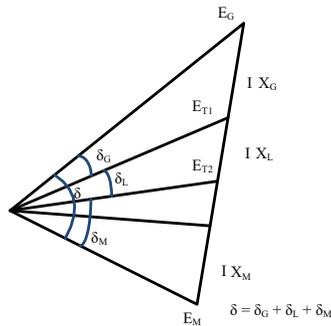


Gambar 2.3. Model ideal sistem dua mesin [1].

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 karena kurangnya torsi sinkronisasi 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.

Penurunan tegangan bus sistem 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 prosentasenya 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. Jumlah 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 listrik generator jauh melampaui daya masukan mekanis generator atau daya yang dihasilkan penggerak mula, dan kekurangan ini disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Sehingga putaran generator turun atau frekuensi sistem turun, sudut daya δ bertambah besar dan melampaui sudut kritisnya, akibatnya generator akan lepas sinkron atau tidak stabil. Sesaat dilakukannya pembebanan tersebut, rotor generator akan mengalami ayunan dan getaran yang besar.

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 <i>prime mover</i> dikurangi dengan momen putar perlambatan (<i>retarding</i>) 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 (<i>net</i>), 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_m 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:

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

$$H = \frac{1/2 M \omega_{sm}}{S_{mach}} \quad (2.11)$$

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

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

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

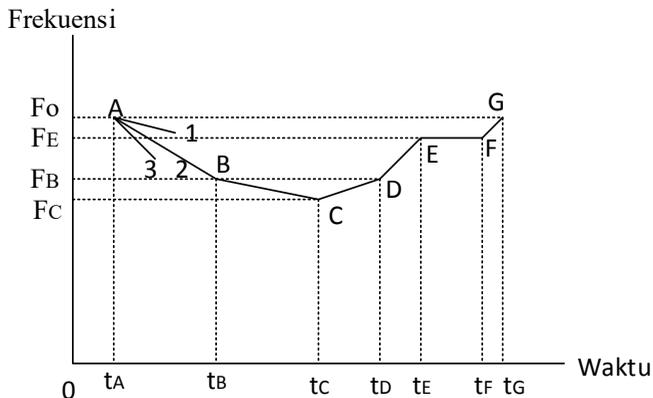
Kemudian dengan membagi persamaan 2.13 dengan S_{mach} diperoleh :

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

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

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 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 Fr. 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 fC.

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 tD.

Waktu sebelum bekerjanya governor ini (tD) 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 fE. 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 fO 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 karena turunnya tegangan hingga 80%, operator akan mengambil inisiatif sendiri untuk melakukan pelepasan beban.

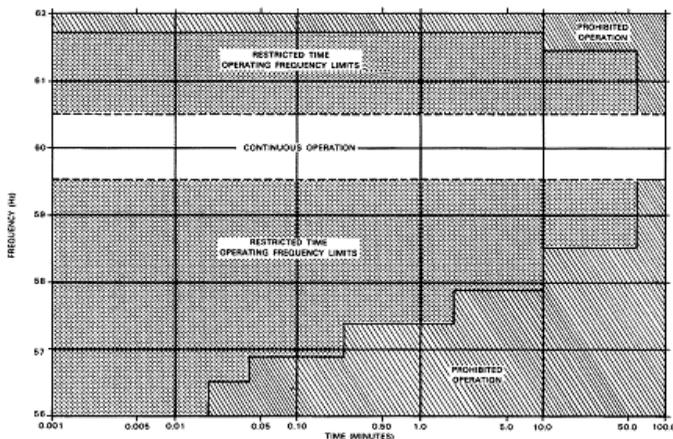
Kekurangan dari pelepasan beban secara manual adalah kebutuhan akan operator yang siap dan handal karena keterlambatan operator dalam mengatasi permasalahan ini akan berakibat fatal pada stabilitas sistem.

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.

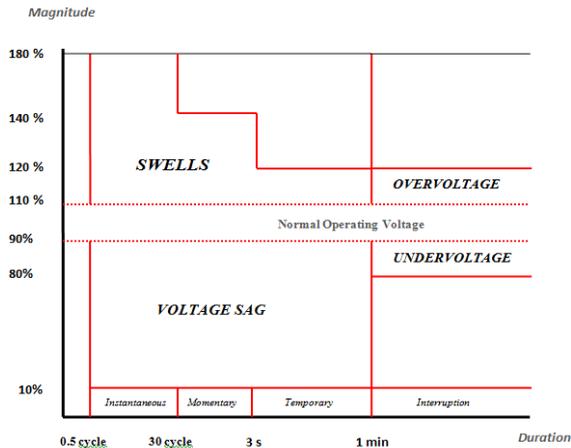
Gambar 2.6. menunjukkan batas operasi frekuensi abnormal untuk *steam turbin* dimana daerah antara 59.5 Hz dan 60.5 Hz merupakan batas untuk operasi kontinu dari generator turbin uap. Sedangkan untuk daerah yang diarsir adalah daerah terlarang frekuensi abnormal dalam batas waktu tertentu. Sebagai contoh,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

Skema pelepasan beban menurut standar ANSI/IEEE C37.106-1987 ada dua jenis, yakni pelepasan beban menggunakan tiga langkah dan pelepasan beban menggunakan enam langkah. Pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2 akan dipaparkan skema pelepasan beban tiga langkah sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

Tabel 2.1. Skema Pelepasan Beban Tiga Langkah (60Hz) [7].

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)

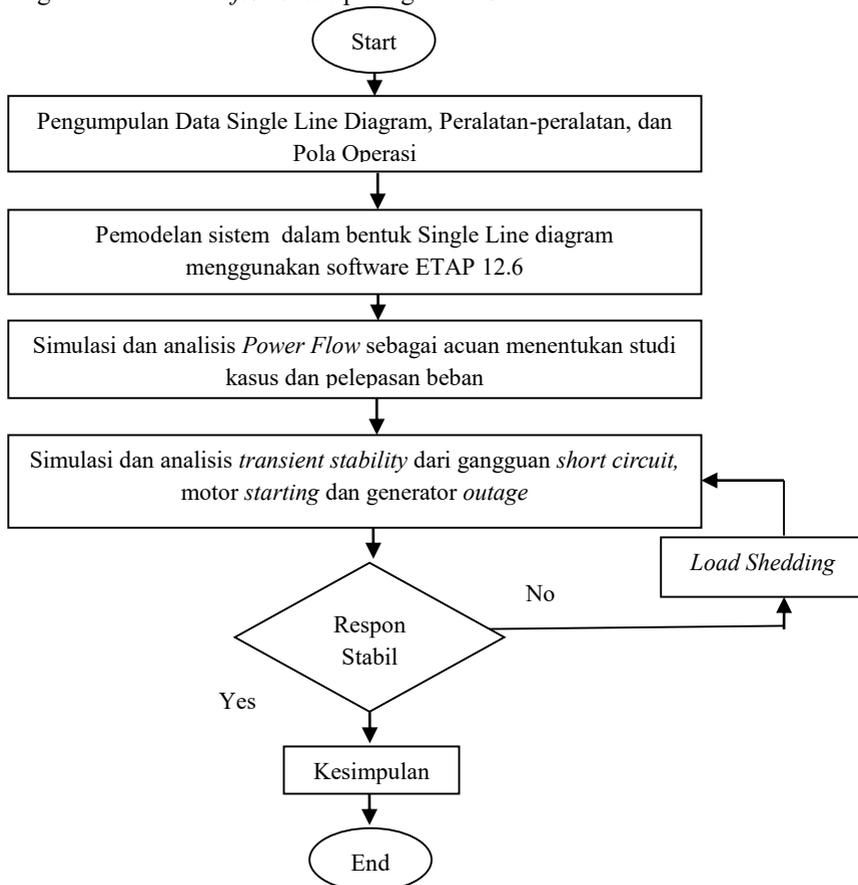
Langkah	Titik Pemberhentian Frekuensi (Hz)	Jumlah Pelepasan Beban (%)	Waktu <i>delay</i> pada relay (Cycles)
1	49,41	10	6
2	49,08	15	6
3	48,75	Disarankan untuk menangkap penurunan sebelum 48,5 Hz	

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. SEMEN INDONESIA PABRIK ACEH

3.1. Metode Pelaksanaan Studi

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



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Pelaksanaan Studi

3.2. Sistem Kelistrikan di PT. SEMEN ACEH

PT. SEMEN ACEH merupakan salah satu perusahaan penghasil semen di Indonesia yang terletak di Pidie, Aceh. Pada perencanaannya, PT. SEMEN ACEH memiliki sebuah sistem yang cukup besar dan cukup kompleks. Terdapat 2 alternatif sistem kelistrikan yang akan dipasang nantinya dengan sumber yang berbeda antara lain :

1. Alternatif 1 dengan sumber grid PLN (3091MVA_{sc})
2. Alternatif 2 dengan sumber generator 30 MW dan 2 x 25MW

Level tegangan yang digunakan pada sistem kelistrikan Alternatif 1 antara lain 150kV, 6,3 kV dan 0,4 kV dan pada sistem kelistrikan Alternatif 2 antara lain 11kV, 6,3 kV dan 0,4 kV. Sistem ini begitu besar dan kompleks sehingga diperlukan peralatan – peralatan yang handal dan berkualitas agar menjamin kontinuitas proses pengolahan di PT.SEMEN ACEH.

3.3. Data Kelistrikan PT. SEMEN ACEH

3.3.1. Sistem Pembangkitan

Sistem pembangkitan yang direncanakan PT. SEMEN ACEH ada 2 unit pembangkit yang digunakan untuk menyuplai beban yang besar. Pada sistem kelistrikan Alternatif 1 PT.SEMEN ACEH terdiri dari sistem grid PLN dengan besar MVA_{sc} 3091MVA. Sedangkan pada sistem kelistrikan Alternatif 2 PT.SEMEN ACEH terdiri dari 3 unit pembangkit berkapasitas masing – masing 30 MW dan 2x25MW. Semua pembangkitan tersebut menyuplai seluruh plant PT.SEMEN ACEH. Berikut adalah tabel data kapasitas pembangkit di PT.SEMEN ACEH:

Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkit di PT.SEMEN ACEH

No	ID	MW	MVA	kV	PF (%)
1	841BG01	30	37,5	11	80
2	841BG02	25	31,25	11	80
3	841BG03	25	31,25	11	80

Dari 3 unit generator yang beroperasi, 2 unit dioperasikan sebagai *voltage control* dan 1 unit dioperasikan sebagai *swing*. *Swing* generator terletak pada generator dengan ID 841BG01. Berikut adalah tabel data kapasitas dan reaktansi pembangkit PT.SEMEN ACEH:

Tabel 3.2 Data Kapasitas Pembangkit di PT.SEMEN ACEH

STG	841BG01	841BG02
Manufaktur	Steam Turbine	Steam Turbine
Rating Generator	30 MW	25 MW
Rating Frekuensi	50 Hz	50 Hz
Rating Tegangan	11 kV	11 kV
Rating PF	0,8	0,8
FLA Rating	1968 A	1640 A
Pole	4	2
RPM	1500	3000

Tabel 3.3 Data Reaktansi Generator PT.SEMEN ACEH

Reaktansi	Generator	
	841BG01	841BG02
Xd	176%	191,4%
Xd'	28,7%	19,62%
Xd''	18,1%	12,22%
X2	18,1%	14,9%
X0	7,3%	6,37%

3.3.2. Sistem Distribusi

Sistem distribusi yang digunakan pada PT.SEMEN ACEH adalah tipe radial dan level tegangan yang digunakan dalam sistem ini terdiri dari tiga level tegangan yang berbeda yaitu 150kV; 6,3 kV dan 0,4 kV untuk sistem Alternatif 1 dan 11kV; 6,3 kV dan 0,4 kV untuk sistem Alternatif 2. Sistem distribusi memiliki 3 transformator yang akan membagi daya ke 3 *substation* utama. *Substation* tersebut akan dibagi menjadi bagian – bagian *Electrical Room* dengan jumlah 13 *Electrical Room* yang memiliki fungsi operasi yang berbeda – beda dengan rating tegangan 6,3kV.

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

Tabel 3.4 Data Transformator PT. SEMEN ACEH (2-Winding)

No	Transformer ID	Rating		
		MVA	Prim. KV	Sec. KV
1	831TM01.1	2,500	6,300	0,400
2	831TM02.1	2,500	6,300	0,400
3	831TM03.1	2,500	6,300	0,400
4	831TM04.1	3,000	6,300	0,400
5	831TM05.1	2,500	6,300	0,400
6	831TM05.2	3,000	6,300	0,400
7	831TM05.3	2,500	6,300	0,400
8	831TM05.3	2,500	6,300	0,400
9	831TM06.1	1,600	6,300	0,400
10	831TM07.1	2,500	6,300	0,400
11	831TM08.1	2,500	6,300	0,400
12	831TM08.2	2,500	6,300	0,400
13	831TM09.1	1,600	6,300	0,400
14	831TM10.1	1,600	6,300	0,400
15	831TM11.1	2,500	6,300	0,400
16	831TM12.1	1,600	6,300	0,400
17	831TM12.2	2,500	6,300	0,400
18	831TM13.1	2,500	6,300	0,400
19	341SR01TM1	0,630	6,300	0,700
20	341FN03TM1	3,818	6,300	1,835
21	441FN01TM1	3,818	6,300	1,835
22	441FN02TM1	3,818	6,300	1,835
23	471FN03TM1	0,630	6,300	0,700
24	441FN18TM1	1,000	6,300	0,700
25	541SR01TM1	0,500	6,300	0,700
26	541FN05TM1	3,818	6,300	1,835
27	542SR01TM1	0,500	6,300	0,700
28	542FN05TM1	3,818	6,300	1,835

Tabel 3.5 Data Transformator PT.SEMEN ACEH (3-Winding)

No	Transformer ID	Rating		
		Winding	MVA	kV
1	811TX01	Primary:	30,000	150,000
		Secondary:	30,000	6,300
		Tertiary:	5,000	6,300
2	811TX02	Primary:	30,000	150,000
		Secondary:	30,000	6,300
		Tertiary:	5,000	6,300
3	811TX03	Primary:	30,000	150,000
		Secondary:	30,000	6,300
		Tertiary:	5,000	6,300
4	831TM07.2-COOLER	Primary:	5,300	6,300
		Secondary:	1,750	0,700
		Tertiary:	1,750	0,700
5	441KL01TM1 TR.KLN.DRV	Primary:	2,500	6,300
		Secondary:	1,500	0,700
		Tertiary:	1,500	0,700

Untuk sistem kelistrikan Alternatif 2, trafo *3-winding* yang dipasang memiliki nilai rating tegangan 11 kV pada sisi primer dan 6,3 kV pada sisi sekunder dengan kapasitas daya yang sama dengan trafo *3-winding* pada sistem kelistrikan Alternatif 1.

3.3.3. Data Beban

Jumlah kapasitas pembebanan yang terpasang pada plant PT. Semen Aceh dijabarkan pada Tabel 3.7 dengan 3 Substation utama yang terdiri dari beberapa *Electrical Room*.

Tabel 3.6 Data Pembebanan PT.SEMEN ACEH

No	Substation	Feeder	Pembebanan (MW)
1	1	ER 01	1,500
2		ER 02	1,000
3		ER 03	0,600
4		ER 04	7,500

Tabel 3.6 Data Pembebanan PT.SEMEN ACEH (lanjutan)

No	Substation	Feeder	Pembebanan (MW)
5	2	ER 05	11,400
6		ER 06	0,700
7		ER 07	3,100
8	3	ER 08	12,900
9		ER 09	1,100
10		ER 10	0,900
11		ER 11	0,900
12		ER 12	1,600
13		ER 13	0,500

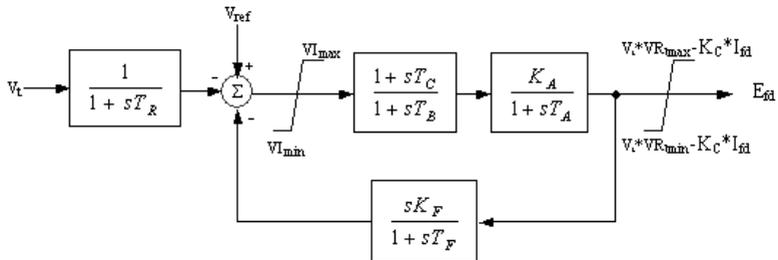
3.4. Data Kontrol Generator PT. SEMEN ACEH

3.4.1 Model Exciter

Pada sistem kelistrikan PT.SEMEN ACEH menggunakan *exciter* tipe ST1 untuk Generator 841BG02 dan 841BG03. Model *block diagram* pada saat simulasi kestabilan transien didapatkan dari ETAP.

Tabel 3.7 Parameter *exciter* tipe ST1

<u>Parameter</u>	<u>Definition</u>	<u>Unit</u>
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 *block diagram* pada saat simulasi kestabilan transien didapatkan dari ETAP.

Tabel 3.8 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	%

Tabel 3.8 Parameter *governor* tipe 505 (lanjutan)

Parameter	Definition	Unit
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	%
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.

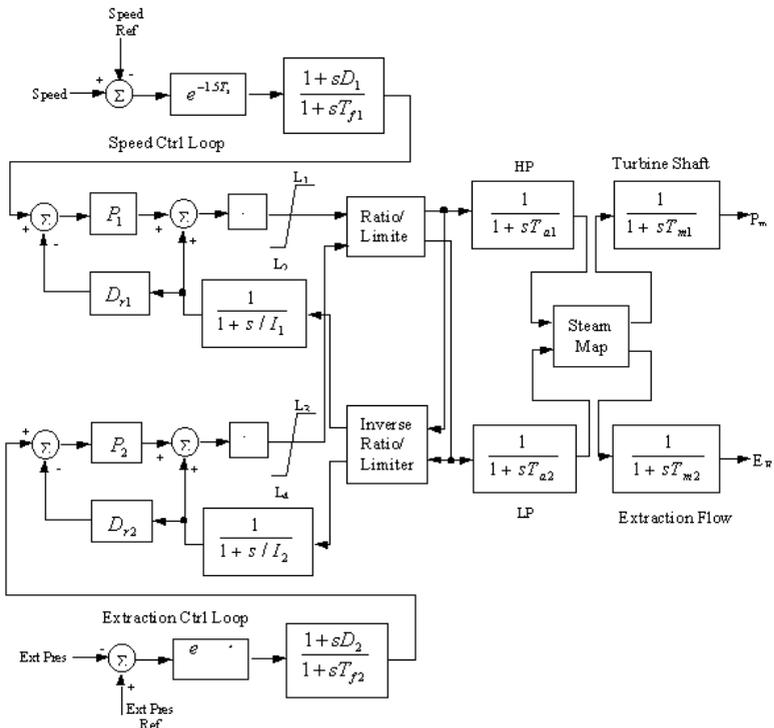
Tabel 3.9 Parameter *governor* tipe 2301

Parameter	Definition	Unit
Mode	Droop or Isoch	
LS GP#	Load Sharing Group Number	
Droop	Steady-state speed droop in second	%
qmax	Min. shaft position in degrees	Deg
qmin	Max. shaft position in degrees	Deg
a	Gain setting	
b	Reset setting	
r	Actuator compensation setting	
K1	Partially very high pressure power fraction	Deg/A
t	Actuator time constant	Sec.

Table 3.9 Parameter governor tipe 2301 (lanjutan)

Parameter	Definition	Unit
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/(qmax-qmax))	Pm p.u./Deg

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



Gambar 3.3 Diagram Blok Governor 505

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS KESTABILAN TRANSIEN DI PT. SEMEN ACEH

4.1. Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. SEMEN ACEH

Gambar di lampiran merupakan hasil pemodelan *single line diagram* PT. SEMEN ACEH yang dimodelkan berdasarkan data-data yang ada. Setelah melakukan pemodelan sistem dilanjutkan dengan melakukan simulasi *transient stability* menggunakan *software* ETAP 12.6 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 ACEH

Tabel 4.1. Total pembangkitan dan beban di PT. SEMEN ACEH pada sistem kelistrikan Alternatif 1

Keterangan	MW	Mvar	MVA	% PF
Sources Swing Bus (es)	42,364	14,817	44,881	94,39 Lag
Sources Non-Swing Bus	-	-	-	-
Total Demand	42,364	14,817	44,881	94,39 Lag
Total Motor Load	37,943	39,570	54,822	69,21 Lag
Total Static Load	1,433	-3,478	31,511	80 Lead
Apparent Losses	2,987	-6,725		

Tabel 4.2. Total pembangkitan dan beban di PT. SEMEN ACEH pada sistem kelistrikan Alternatif 2

Keterangan	MW	Mvar	MVA	% PF
Sources Swing Bus (es)	10,380	4,952	11,501	90,26 Lag
Sources Non-Swing Bus	32,000	9,903	33,498	95,53 Lag
Total Demand	42,380	14,855	44,908	94,37 Lag
Total Motor Load	37,943	39,570	54,822	69,21 Lag
Total Static Load	1,449	-31,437	31,471	4,60 Lead
Apparent Losses	2,988	6,722		

Total pembangkitan di PT. SEMEN ACEH sebesar 44,881 MVA dengan faktor daya 94,39 *lagging* terdiri dari PLN untuk Alternatif 1 dan sebesar 44,908 MVA terdiri dari generator yang dioperasikan *swing* sebesar 11,501 MVA dengan faktor daya 90,26 *lagging* dan generator yang dioperasikan *voltage control* sebesar 33,498 MVA dengan faktor daya 95,53 *lagging*. Sedangkan untuk beban, total beban motor di PT. SEMEN ACEH sebesar 37,943 MVA dengan faktor daya 69,21 *lagging* dan total beban statis sebesar 31,471 MVA dengan faktor daya 4,60 *leading*.

4.3. Studi kasus kestabilan transien

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

- a) *Generator outage* :
Pada kasus ini terdapat terdapat salah satu generator (841BG02) yang lepas dari sistem. Studi kasus ini hanya dilakukan pada sistem kelistrikan alternatif 2.
- b) *Hubung singkat* :
Pada kasus ini disimulasikan gangguan hubung singkat pada setiap level tegangan :
 - Tegangan 6.3 kV : bus 831MV081 dan 831MV082
 - Tegangan 0,4 kV : bus 831LV081 dan 831LV082
- c) *Motor starting* :
Pada kasus ini disimulasikan saat terjadi *starting* motor terbesar pada sistem (Motor 341FN02M01).

Tabel 4.3 menjelaskan studi kasus yang telah disimulasikan secara lengkap :

Tabel 4.3. Studi kasus kestabilan transien Alternatif 1

Kasus	Keterangan	Waktu (s)
Short Circuit		
SC 6.3kV	Hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV08.1	2
	831MV08.1-CB5 open	2,3
	Hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV08.2	2
	831MV08.2-CB5 open	2,3

Tabel 4.3. Studi kasus kestabilan transien Alternatif 1 (lanjutan)

Kasus	Keterangan	Waktu (s)
Short Circuit		
SC 0.4kV	Hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV08.1	2
	831LV08.1-CB1 open	2,3
	Hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV08.2	2
	831LV08.2-CB1 open	2,3
Motor Starting		
MS 7100	Motor 341FN02M01 7100kW start	2

Tabel 4.4. Studi kasus kestabilan transien Alternatif 2

Kasus	Keterangan	Waktu (s)
Generator Outage		
Gen Out 1	Generator 841BG02 trip	2
Gen Out 1 LS	Generator 841BG02 trip	2
	Load shedding tahap 1	2,451
	Load shedding tahap 2	2,772
Short Circuit		
SC 6.3kV	Hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV08.1	2
	831MV08.1-CB5 open	2,3
	Hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV08.2	2
	831MV08.2-CB5 open	2,3
SC 0.4kV	Hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV08.1	2
	831LV08.1-CB1 open	2,3
	Hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV08.2	2
	831LV08.2-CB1 open	2,3
Motor Starting		
MS 7100	Motor 341FN02M01 7100kW start	2

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

- a. Main Bus Sistem : bus yang mewakili tegangan 11 kV pada sistem kelistrikan alternative 2
- b. Main Bus PLN : bus yang mewakili tegangan 150kV pada sistem kelistrikan alternatif 1
- c. 831MV012 : bus yang mewakili tegangan 6.3 kV
- d. 831LV052 : bus yang mewakili tegangan 0.4 kV
Sedangkan untuk kasus *motor starting* bus yang digunakan sebagai indikasi stabilitas sistem adalah :
- e. Bus 341FN01M01 : bus yang terhubung dengan motor
Selanjutnya langkah-langkah yang akan dilakukan dalam analisis kestabilan transien yaitu:
 - a. Mengamati respon frekuensi dan tegangan sistem untuk sistem kelistrikan alternatif 1 dan respon frekuensi dan tegangan sistem serta sudut rotor generator untuk alternatif 2.
 - b. Menganalisis apakah respon frekuensi dan tegangan serta sudut rotor kembali stabil atau tidak sesuai dengan standar yang diijinkan.
 - c. Jika sistem belum mampu mencapai kondisi stabil sesuai standar, maka dilakukan mekanisme pelepasan beban (*load shedding*).

4.4. Simulasi dan analisis kestabilan transien

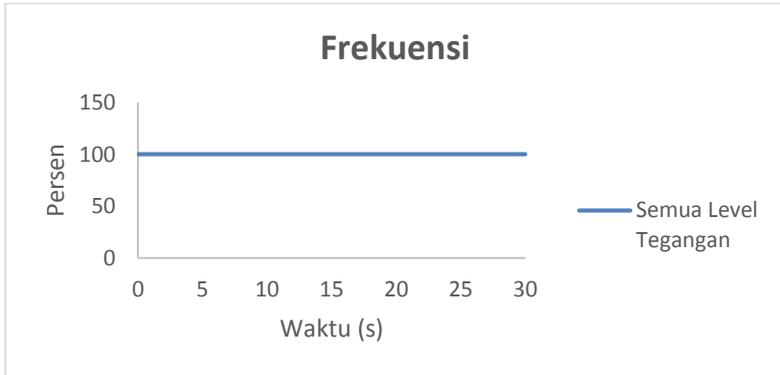
Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai hasil simulasi dan analisis dari setiap kasus yang disimulasikan. Respon sistem yang dianalisis meliputi respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem.

4.4.1. Simulasi kestabilan transien untuk kasus *short circuit* pada Alternatif 1

Pada sub bab ini akan dianalisis hasil simulasi untuk kasus *Short circuit* pada sistem kelistrikan Alternatif 1.

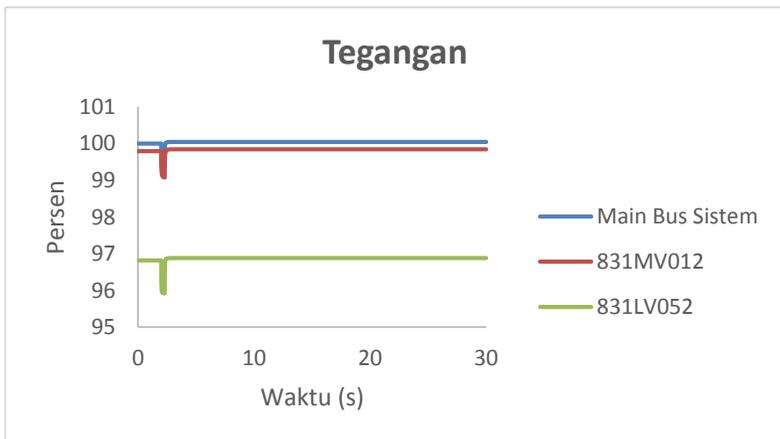
4.4.1.1. Studi Kasus SC 0.4 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 0.4 kV bus 831LV08.1 ($t=2$ detik), CBI-831LV081 open ($t=2.3$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 yang mewakili profil tegangan 0,4kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2,3 CBI-831LV081 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4.1. Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081

Pada gambar 4.1 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus bus 831LV081 pada detik ke 2, frekuensi sistem tidak berubah dengan nilai 100%. Hal ini diakibatkan karena frekuensi sumber PLN yang terlalu kuat sehingga sistem tetap stabil meskipun mengalami gangguan.



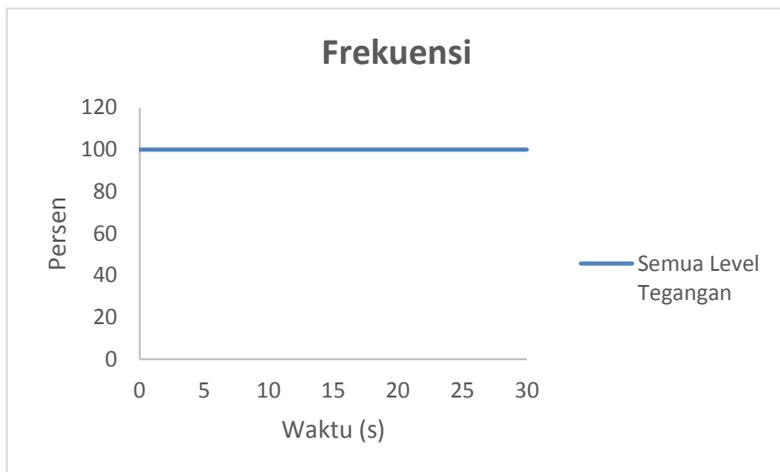
Gambar 4.2. Respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.2 dapat dilihat respon tegangan sistem saat mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 pada detik ke 2. Setelah terjadi gangguan, tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 95,91% dan kembali naik menjadi 96,88%.

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

4.4.1.2. Studi Kasus SC 0.4 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 0.4 kV bus 831LV08.2 ($t=2$ detik), CB1-831LV082 open ($t=2.3$ detik)

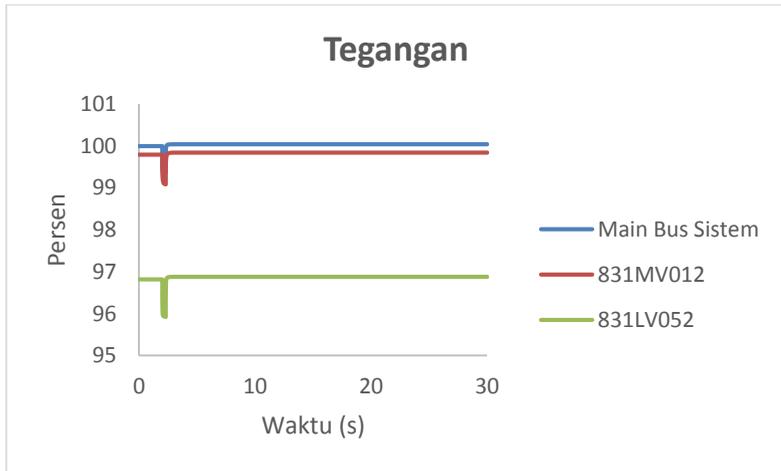
Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082 yang mewakili profil tegangan 0,4 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2,3 CB1-831LV082 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.3 dan 4.4.



Gambar 4.3. Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082

Pada gambar 4.3 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus bus 831LV082 pada detik ke 2, frekuensi sistem tidak berubah dengan nilai 100%. Hal ini diakibatkan

karena frekuensi sumber PLN yang terlalu kuat sehingga sistem tetap stabil meskipun mengalami gangguan.



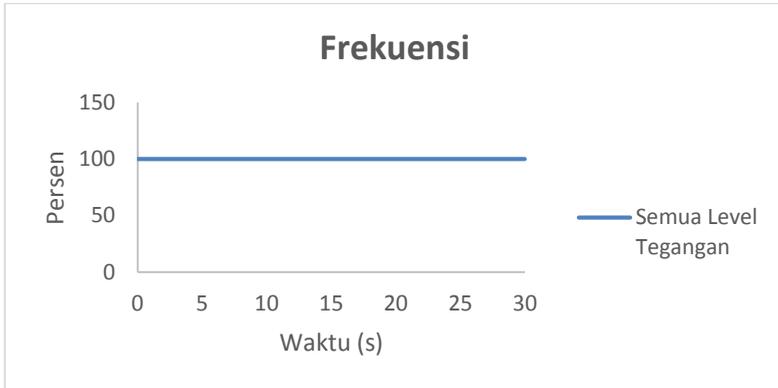
Gambar 4.4. Respon respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082 dan CB1-831LV082 *open* untuk mengatasi gangguan.

Pada gambar 4.4 dapat dilihat respon tegangan sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus 831LV082 pada detik ke 2. Setelah terjadi gangguan tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 95,92% dan kembali naik menjadi 96,88%.

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

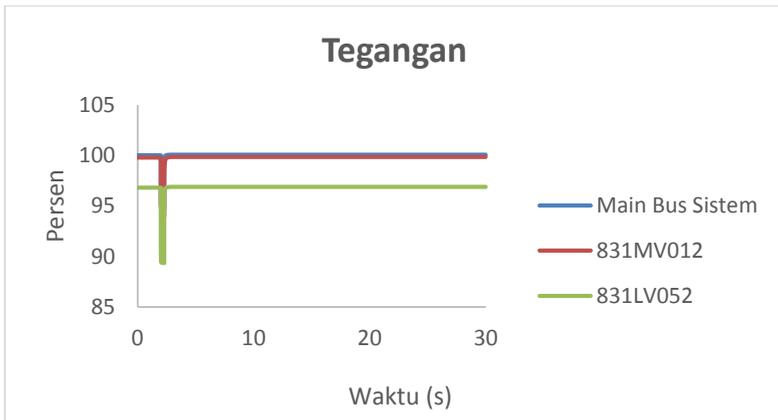
4.4.1.3. Studi Kasus SC 6.3 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 6.3 kV bus 83MLV08.1 ($t=2$ detik), CB5-831MV081 *open* ($t=2.3$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 yang mewakili profil tegangan 6,3 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2,3 CB5-831MV081 *open* untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6.



Gambar 4.5. Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081

Pada gambar 4.5 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus 831MV081. Saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus bus 831MV081 pada detik ke 2, frekuensi sistem tidak berubah dengan nilai 100%. Hal ini diakibatkan karena frekuensi sumber PLN yang terlalu kuat sehingga sistem tetap stabil meskipun mengalami gangguan.



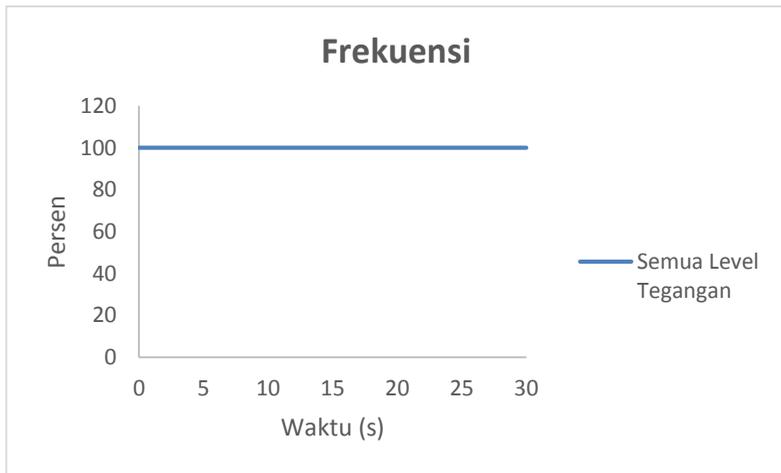
Gambar 4.6. Respon respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 dan CB5-831MV081 *open* untuk mengatasi gangguan.

Pada gambar 4.6 dapat dilihat respon tegangan sistem saat mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 pada detik ke 2. Setelah terjadi gangguan, tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 89,35% dan kembali naik menjadi 96,89%.

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

4.4.1.4. Studi Kasus SC 6.3 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 6.3 kV bus 831MV08.2 ($t=2$ detik), CB5-831MV082 open ($t=2.3$ detik)

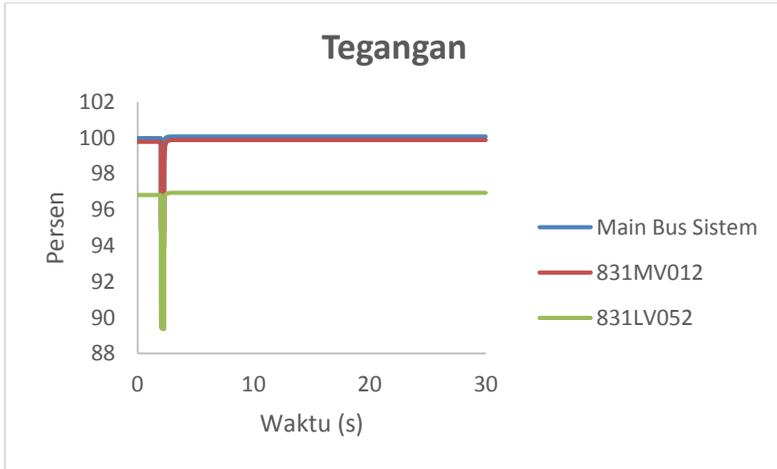
Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 yang mewakili profil tegangan 6,3 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2,3 CB5-831MV082 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.7 dan 4.8.



Gambar 4.7. Respon frekuensi saat gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082

Pada gambar 4.7 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus bus 831MV082 pada detik ke 2, frekuensi sistem tidak berubah dengan nilai 100%. Hal ini diakibatkan

karena frekuensi sumber PLN yang terlalu kuat sehingga sistem tetap stabil meskipun mengalami gangguan.



Gambar 4.8. Respon respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 dan CB5-831MV082 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.8 dapat dilihat respon tegangan sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus 831MV082 pada detik ke 2. Setelah terjadi gangguan tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 89,36% dan kembali naik menjadi 96,94%.

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

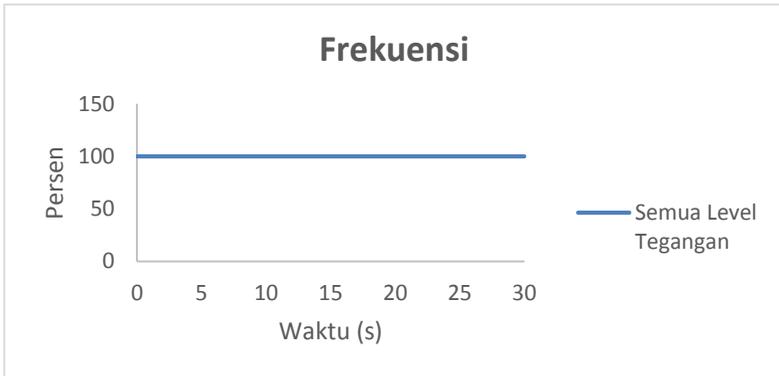
4.4.2. Simulasi kestabilan transien untuk kasus *motor starting* pada Alternatif 1

Pada sub bab ini akan dianalisis hasil simulasi untuk kasus *motor starting* pada sistem kelistrikan Alternatif 1.

4.4.2.1. Studi kasus *Mstart: Motor 341FN01M01 7,1 MW starting (t=2 detik)*

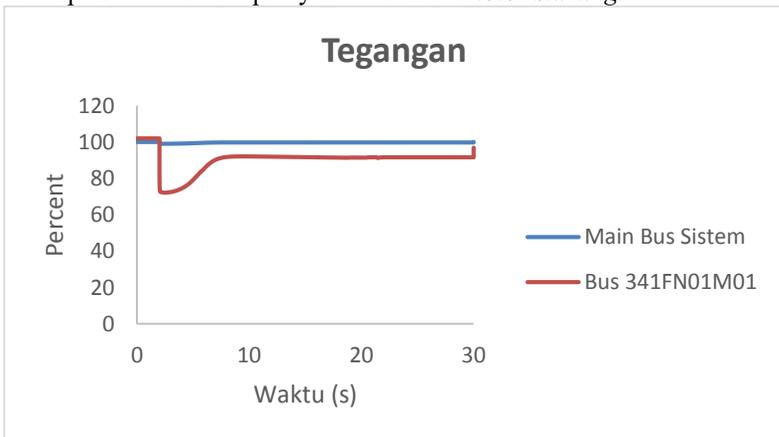
Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika motor 341FN01M01 *starting* pada detik ke 2. *Starting motor* dilakukan dengan

metode *rotor resistance* sehingga simulasi dilakukan dengan memilih metode akselerasi rotor resistor. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.9 dan 4.10.



Gambar 4.9. Respon frekuensi saat *motor starting* 341FN01M01

Pada gambar 4.9 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat motor M532FN11 *starting*. Saat motor 341FN01M01 *starting* pada detik ke 2, frekuensi sistem turun mencapai 100%. Hal ini diakibatkan karena frekuensi sumber PLN yang terlalu kuat sehingga sistem tetap stabil meskipun sistem diserap daya besar akibat *motor starting*.



Gambar 4.10. Respon tegangan bus motor saat *motor starting* 341FN01M01

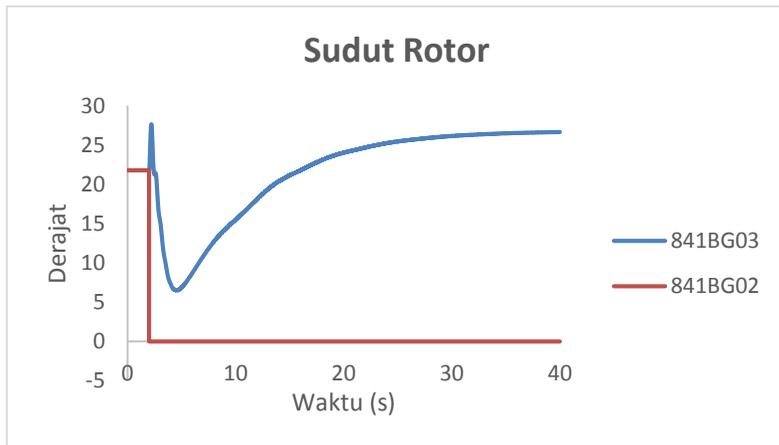
Pada gambar 4.10 dapat dilihat respon tegangan pada saat motor 341FN01M01 *starting*. Pada bus 341FN01M01 nilai tegangan sebelum adanya *motor starting* 101,93%. Namun setelah terjadi *motor starting* pada detik ke 2 tegangan akan turun sampai 72,20% kemudian akan kembali *steady state* pada nilai 91,57%. 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 frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus *motor starting*.

4.4.3. Simulasi kestabilan transien untuk kasus *generator outage* pada Alternatif 2

Pada sub bab ini akan dianalisis hasil simulasi untuk kasus *generator outage* pada sistem kelistrikan Alternatif 2.

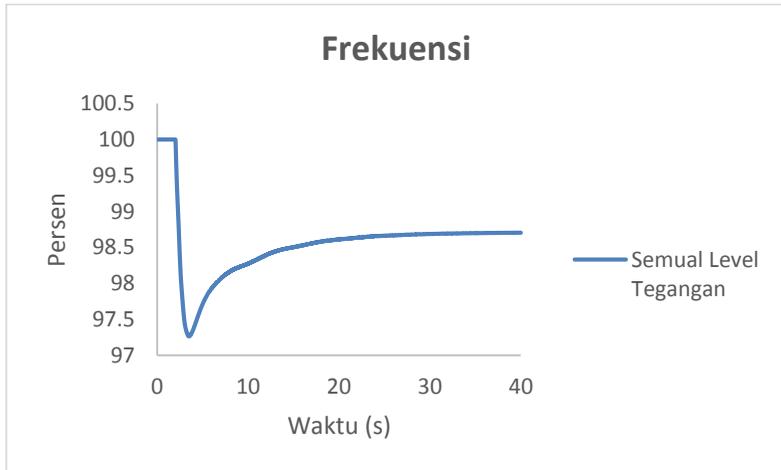
4.4.3.1. Studi kasus *Gen Out 1 : Generator 841BG02 lepas dari sistem (t = 2 detik)*

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika salah satu generator lepas dari sistem yaitu generator 841BG02. Lepasnya generator 841BG02 disimulasikan pada detik ke 2. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.11, 4.12 dan 4.13.



Gambar 4.11. Respon sudut rotor saat generator 841BG02 lepas dari sistem

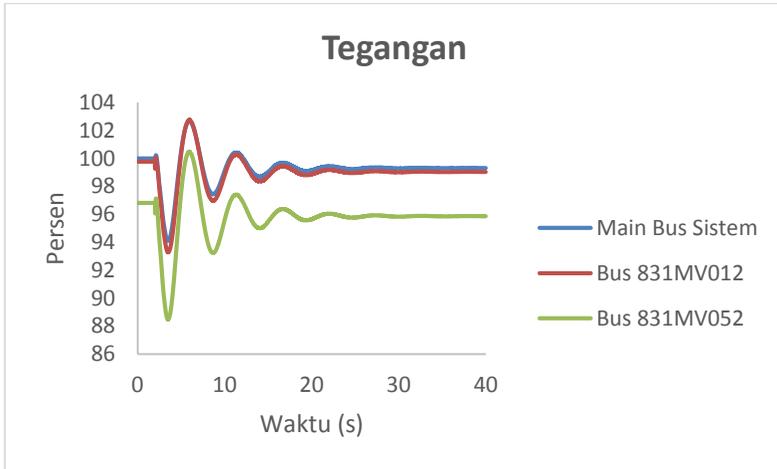
Pada gambar 4.11 dapat dilihat respon sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03. Sudut rotor generator 841BG02 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan berubah menjadi 0° . Pada sudut rotor 841BG03 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan berubah menjadi $26,64^\circ$.



Gambar 4.12. Respon frekuensi saat generator 841BG02 lepas dari sistem

Pada gambar 4.12 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator 841BG02 lepas dari sistem pada detik ke 2. Frekuensi sistem yang pada awal sebelum gangguan sebesar 100%, pada detik ke 2 mulai menurun hingga sebesar 97,264% akibat salah satu generator lepas dan mencapai kondisi *steady state* hingga 98,703%. Menurunnya frekuensi sistem tersebut diakibatkan karena daya masukan dari generator lebih kecil daripada daya permintaan beban sehingga rotor melambat dan putaran sinkron juga berkurang.

Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem tersebut belum stabil sehingga perlu dilakukan *load shedding* untuk mengembalikan kestabilan sistem.



Gambar 4.13. Respon tegangan saat generator 841BG02 lepas dari sistem

Pada gambar 4.13 dapat dilihat respon tegangan sistem saat generator 841BG02 lepas dari sistem pada detik ke 2. Setelah terjadi gangguan, tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 88,478% dan akan kembali *steady state* pada 95,864%.

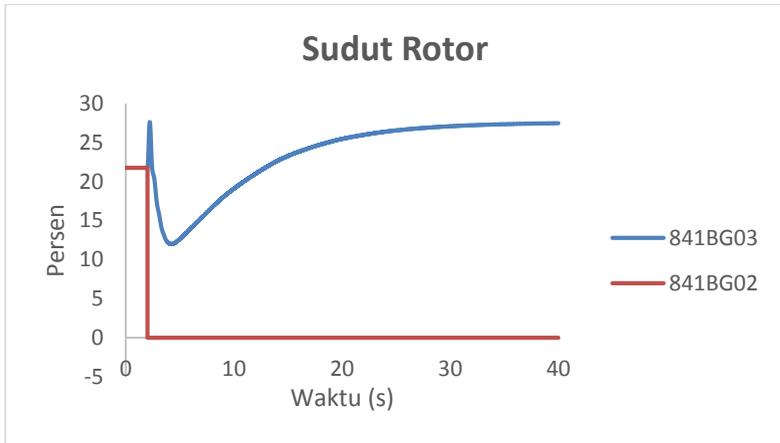
Dari data di atas dapat disimpulkan bahwa sistem tidak stabil dan harus dilakukan pelepasan beban untuk mengembalikan kestabilan sistem.

4.4.3.2. Studi kasus Gen Out 1 LS: Generator 841BG02 lepas dari sistem ($t=2$ detik) dan diikuti load shedding

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika salah satu generator lepas dari sistem yaitu generator 841BG02 dan diikuti dengan *load shedding*. Pada tugas akhir ini menggunakan *load shedding* tiga tahap berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987.

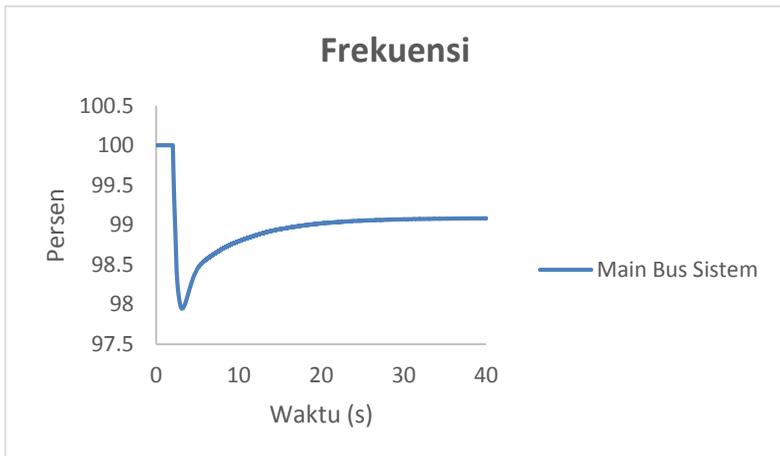
Load shedding tahap 1 ($t=2,451$ detik)

Dikarenakan sistem tidak stabil sehingga dilakukan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 2,451 Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.14, 4.15 dan 4.16.



Gambar 4.14. Respon sudut rotor saat generator 841BG03 lepas dari sistem dan diikuti Load Shedding tahap 1

Pada gambar 4.14 dapat dilihat respon sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03. Sudut rotor generator 841BG02 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan berubah menjadi 0° . Pada sudut rotor 841BG03 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan berubah menjadi $27,48^\circ$.



Gambar 4.15. Respon frekuensi saat generator 841BG02 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1

Pada gambar 4.15 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator 841BG02 lepas dari sistem 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%. *Load shedding* tahap 1 dilakukan pada detik ke 2,451 dengan melepas beban sebesar 10% dari total beban yaitu sebesar 4,24 MW. Namun dari hasil *load shedding* tahap 1 kondisi sistem masih tidak stabil. Frekuensi sistem terus menurun hingga kondisi *steady state* sebesar 99,082%. Berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dimana untuk operasi kontinu frekuensi dikatakan stabil jika nilainya antara 99.17-100.83%, maka frekuensi sistem belum stabil sehingga perlu dilakukan *load shedding* tahap 2 untuk mengembalikan kestabilan sistem.



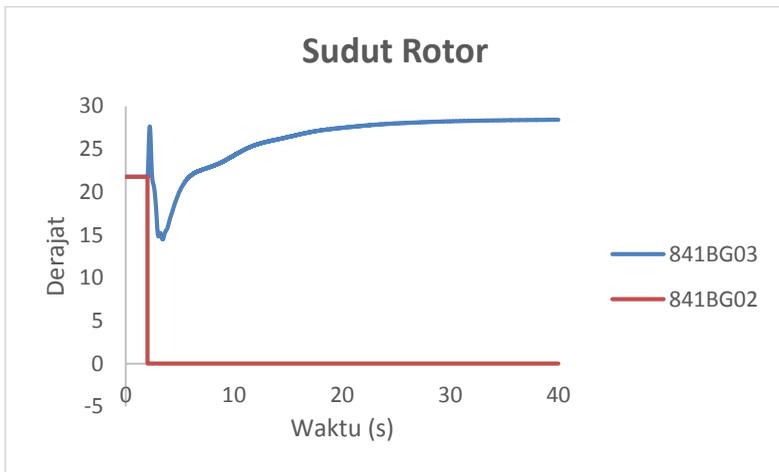
Gambar 4.16. Respon tegangan saat generator 841BG03 lepas dari sistem dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1

Pada gambar 4.16. dapat dilihat respon tegangan sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 2,451. Setelah terjadi gangguan tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 95,546% dan akan kembali *steady state* pada 97,121%.

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

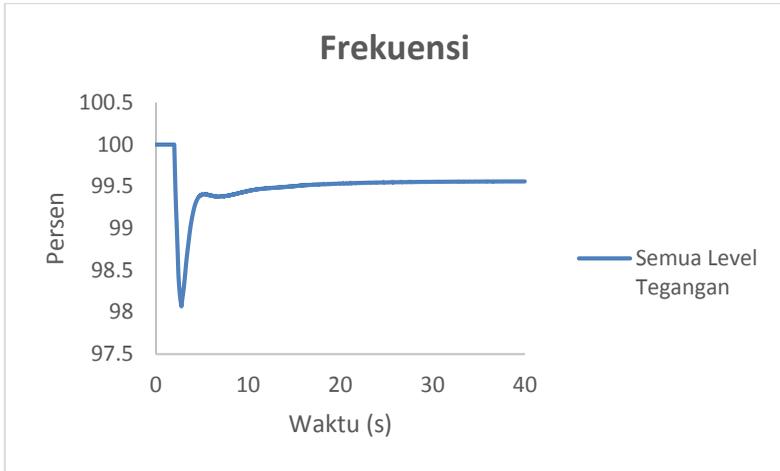
Load shedding tahap 2 (t=2,772 detik)

Dikarenakan sistem tidak stabil setelah dilakukan *load shedding* tahap 1 sehingga dilakukan *load shedding* tahap 2 pada detik ke 2,772. Nilai angka waktu ini di dapatkan berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 untuk pelepasan beban agar mengembalikan frekuensi pada standar nilai yang diijinkan. Pelepasan beban tahap 2 dilakukan pada saat frekuensi mencapai *trip point* 49,08 Hz (detik ke 2,652) ditambah dengan waktu *delay* sebesar 6 cycle (0,12 detik) sehingga pelepasan beban dilakukan pada detik ke $2,652 + 0,12 = 2,772$ dengan melepas beban sistem sebesar 15% dari total pembebanan setelah dilakukan Load Shedding 1. Adapun *kuantum* beban yang dilepas sebesar 15% dari 38,16MW yaitu 5,73MW. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.17, 4.18 dan 4.19.

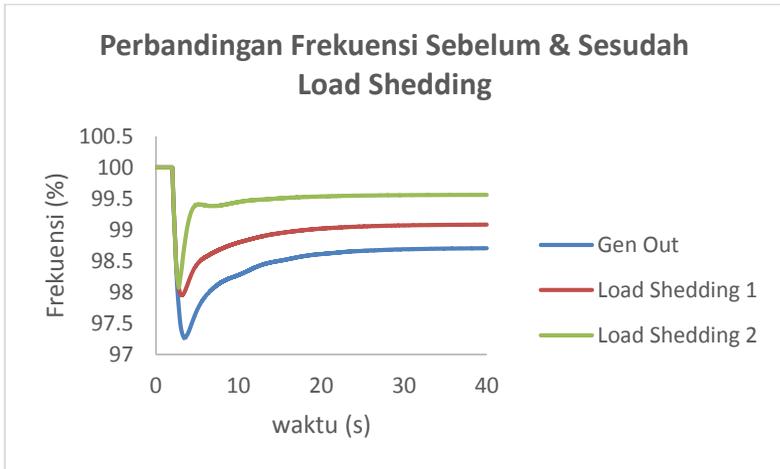


Gambar 4.17. Respon sudut rotor saat generator 841BG03 lepas dari sistem

Pada gambar 4.17 dapat dilihat respon sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03. Sudut rotor generator 841BG02 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan berubah menjadi 0° . Pada sudut rotor 841BG03 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan berubah menjadi $28,41^\circ$.



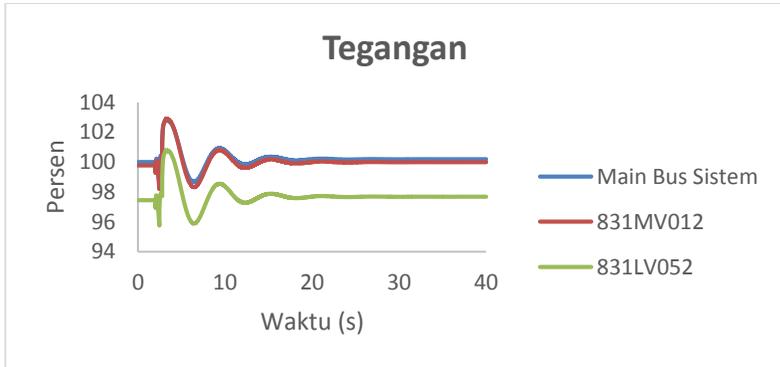
Gambar 4.18. Respon frekuensi saat generator 841BG03 lepas dari sistem pada dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 dan tahap 2



Gambar 4.19. Respon frekuensi sistem sebelum dan sesudah dilakukan *Load Shedding*

Pada gambar 4.18 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat generator 841BG02 lepas dari sistem pada detik ke 2 diikuti dengan *load shedding* tahap 1 pada detik ke 2,451 dan *load shedding* tahap 2 pada detik

2,772 dengan melepas beban sebesar 15% dari total beban yaitu sebesar 5,73 MW. Setelah dilakukan *load shedding* tahap 2, frekuensi sistem menurun hingga 98,06% dan kembali stabil pada 99,56%. 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 4.20. Respon tegangan saat generator 841BG03 lepas dari sistem pada dan diikuti dengan *load shedding* tahap 1 dan tahap 2

Pada gambar 4.19. dapat dilihat respon tegangan sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap 2 pada detik ke 2,767. Setelah terjadi gangguan tegangan pada masing-masing bus sistem menurun hingga 95,881% dan akan kembali *steady state* pada 97,676%.

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 Generator 841BG02 outage:

Tabel 4.5. Tabel rekapitulasi kuantitas beban untuk *load shedding* kasus Gen Out

Load shedding	Beban (MW)	Beban (%)	t (detik)
Load shedding tahap 1	4,24	10	2,451
Load shedding tahap 2	5,73	15.02	2,772
Total	9,97	25.02	

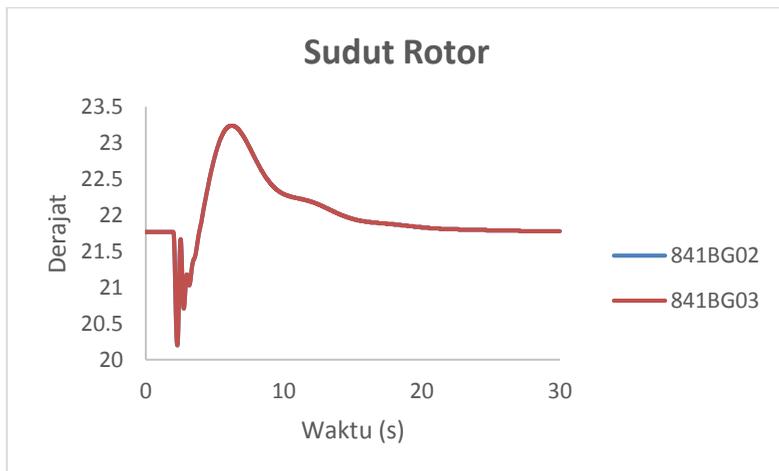
Dari hasil analisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus generator 841BG02 lepas dari sistem setelah dilakukan *load shedding* tahap ke 2. Kuantitas beban yang harus dilepas adalah 9,97 MW atau 25,02% dari total beban.

4.4.4. Simulasi kestabilan transien untuk kasus *short circuit* pada Alternatif 2

Pada sub bab ini akan dianalisis hasil simulasi untuk kasus *Short circuit* pada sistem kelistrikan Alternatif 2.

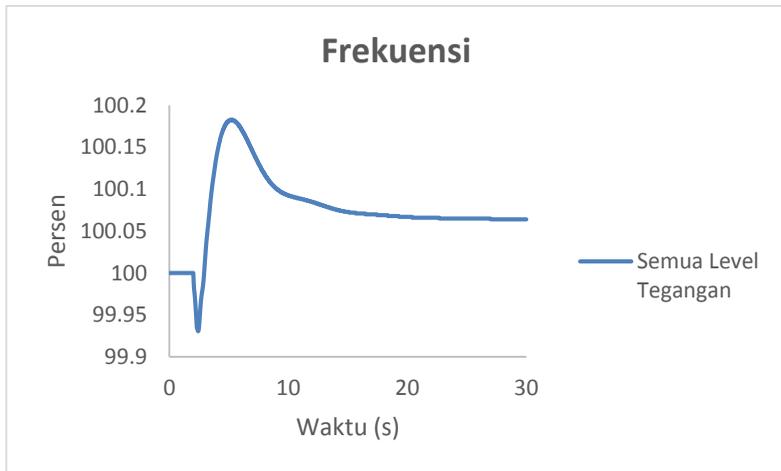
4.4.4.1. Studi Kasus SC 0.4 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 0.4 kV bus 831LV08.1 ($t=2$ detik), CB1-831LV081 open ($t=2.3$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 yang mewakili profil tegangan 0.4 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2,3 CB 831LV081 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.20, 4.21 dan 4.22.



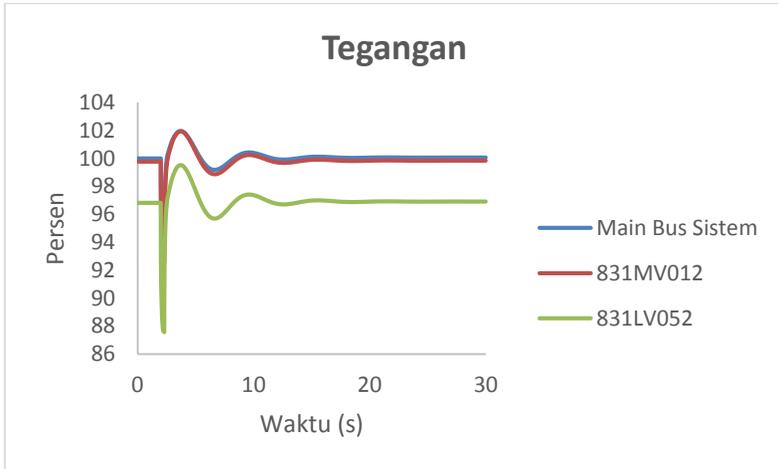
Gambar 4.21. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 open untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.20 dapat dilihat respon sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03. Sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan beresilasi hingga mencapai nilai puncak $23,24^\circ$. Nilai *steady state* rotor generator 841BG02 dan 841BG03 menjadi $21,78^\circ$ setelah gangguan.



Gambar 4.22. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.21 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus 831LV081 pada detik ke 2, frekuensi sistem naik mencapai 100.183%. Hal ini diakibatkan karena lepasnya CB1-831LV081 mengakibatkan hilangnya beban yang berada di bawah bus 831LV081 sehingga besarnya daya pembangkitan lebih besar dari daya yang dibutuhkan beban. Frekuensi mencapai kondisi *steady state* pada 100,064%. 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 4.23. Respon respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 pada bus 831LV081 dan CB1-831LV081 *open* untuk mengatasi gangguan

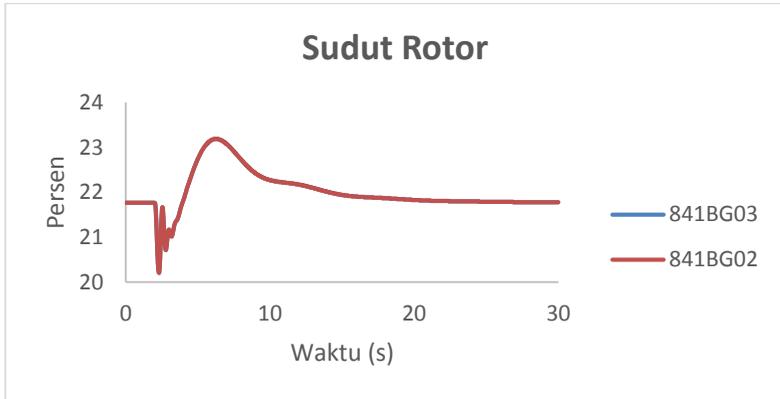
Pada gambar 4.22 dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan. Nilai sebelum gangguan adalah 96,818%. Setelah terjadi hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV081 maka didapatkan nilai terendah dicapai pada 87,658% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 99,513%. Kemudian sistem akan kembali stabil pada nilai 96,905%.

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 831LV081.

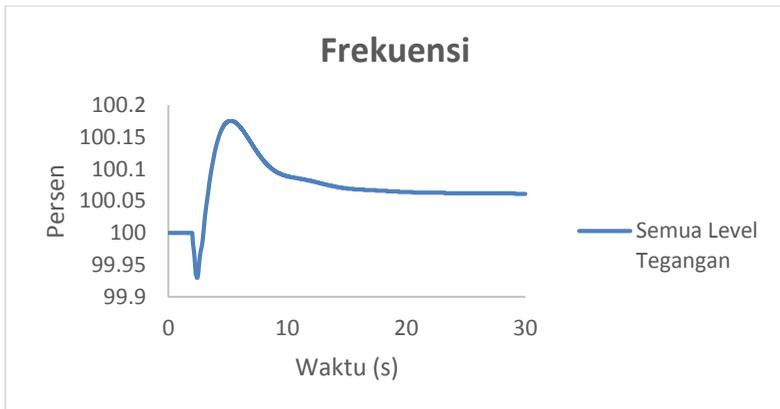
4.4.4.2. Studi Kasus SC 0,4 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 0.4 kV bus 831LV08.2 ($t=2$ detik), CB1-831LV082 *open* ($t=2.3$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082 yang mewakili profil tegangan 0.4 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2,3 CB1-831LV082 *open* untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.23, 4.24 dan 4.25.



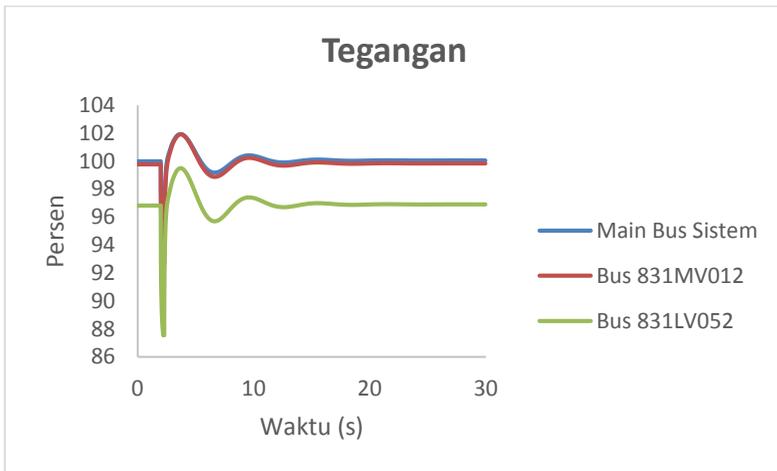
Gambar 4.24. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 pada bus 831LV082 dan CB1-831LV082 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.23 dapat dilihat respon sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03. Sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan beresilasi hingga mencapai nilai puncak $23,19^\circ$. Nilai *steady state* rotor generator 841BG02 dan 841BG03 menjadi $21,78^\circ$ setelah gangguan.



Gambar 4.25. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082 dan CB1-831LV082 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.24 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus 831LV082 pada detik ke 2, frekuensi sistem naik mencapai 100.175%. Hal ini diakibatkan karena lepasnya CB1-831LV082 mengakibatkan hilangnya beban yang berada di bawah bus 831LV082 sehingga besarnya daya pembangkitan lebih besar dari daya yang dibutuhkan beban. Frekuensi mencapai kondisi *steady state* pada 100,061%. 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 respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 pada bus 831LV082 dan CB1-831LV082 *open* untuk mengatasi gangguan

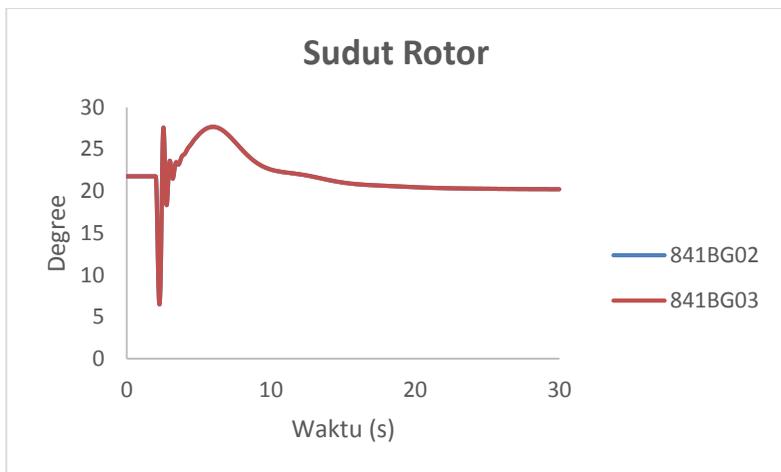
Pada gambar 4.25 dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan. Nilai sebelum gangguan adalah 96,817%. Setelah terjadi hubung singkat 3 fasa pada bus 831LV082 maka didapatkan nilai terendah dicapai pada 87,535% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 99,490%. Kemudian sistem akan kembali stabil pada nilai 96,902%.

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 831LV082.

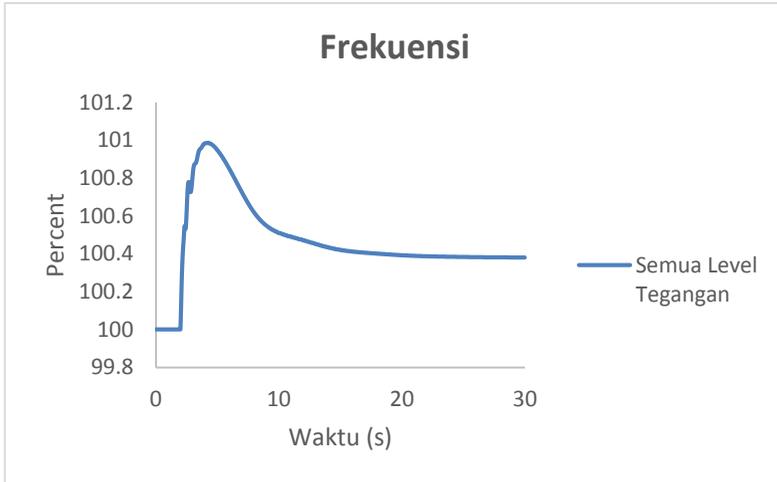
4.4.4.3. Studi Kasus SC 6,3 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 6,3 kV bus 831MV081 ($t=2$ detik), CB5-831MV081 open ($t=2.3$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 yang mewakili profil tegangan 6.3 kV. Gangguan hubung singkat disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2,3 CB5-831MV081 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.26, 4.27 dan 4.28.



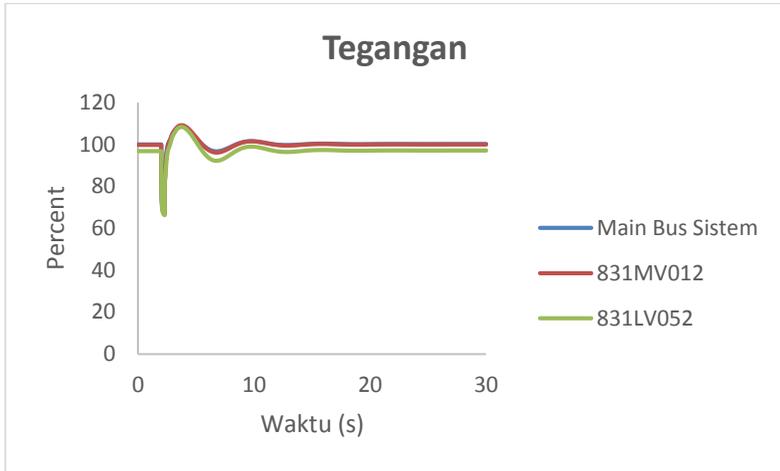
Gambar 4.27. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 pada bus 831MV081 dan CB5-831MV081 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.26 dapat dilihat respon sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03. Sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan beresilasi hingga mencapai nilai puncak $27,66^\circ$. Nilai *steady state* rotor generator 841BG02 dan 841BG03 menjadi $20,23^\circ$ setelah gangguan.



Gambar 4.28. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 dan CB5-831MV081 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.27 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus 831MV081. Saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 pada detik ke 2, frekuensi sistem naik mencapai 100.986%. Hal ini diakibatkan karena lepasnya CB5-831MV081 mengakibatkan hilangnya beban yang berada di bawah bus 831MV081 sehingga besarnya daya pembangkitan lebih besar dari daya yang dibutuhkan beban sehingga putaran sinkron dari sumber generator menjadi lebih cepat dari acuannya yang menyebabkan nilai frekuensi sistem juga bertambah. Dengan persamaan $N_s = 120 f / p$, dimana ketika putaran sinkron bertambah, nilai frekuensi juga bertambah. Frekuensi mencapai kondisi *steady state* pada 100,38%. 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 4.29. Respon respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 pada bus 831MV081 dan CB5-831MV081 *open* untuk mengatasi gangguan

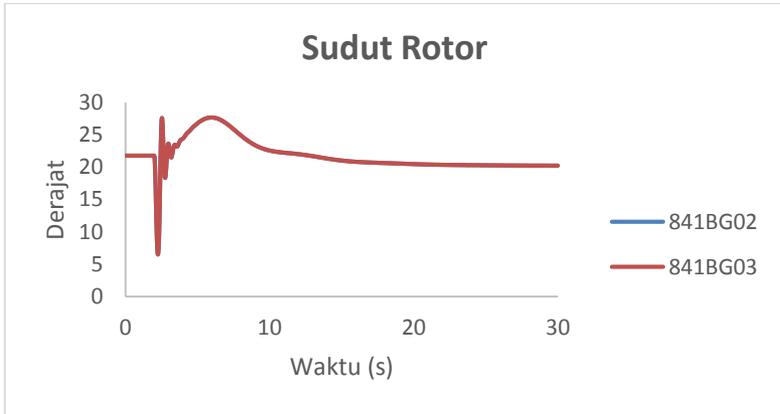
Pada gambar 4.28 dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan. Nilai sebelum gangguan adalah 96,817%. Setelah terjadi hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV081 maka didapatkan nilai terendah dicapai pada 62,326% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 108,359%. Kemudian sistem akan kembali stabil pada nilai 97,09%.

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 831MV081.

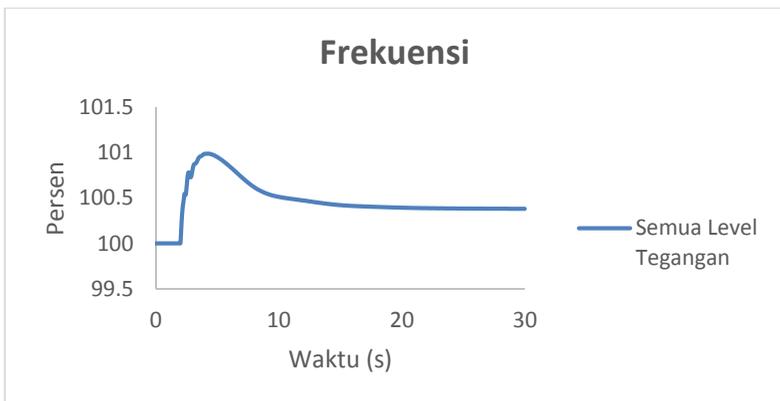
4.4.4.4. Studi Kasus SC 6,3 kV: Hubung singkat 3 fasa pada bus 6,3 kV bus 831MV082 ($t=2$ detik), CB5-831MV082 *open* ($t=2.3$ detik)

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 yang mewakili profil tegangan 6.3 kV. Gangguan hubung singkat 3 fasa disimulasikan pada detik ke 2 dan kemudian pada detik ke 2,3 CB5-831MV081 open untuk mengatasi gangguan. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.29, 4.30 dan 4.31.



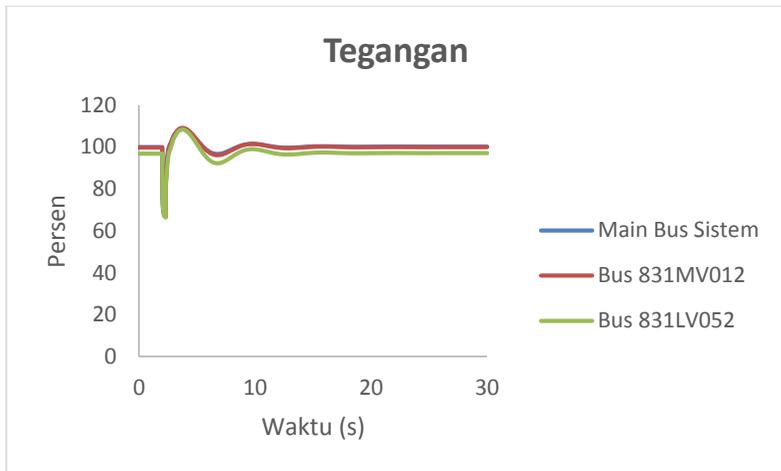
Gambar 4.30. Respon sudut rotor saat terjadi gangguan hubung singkat 3 pada bus 831MV082 dan CB5-831MV082 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.29 dapat dilihat respon sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03. Sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03 saat sebelum gangguan $21,77^\circ$ dan beresilasi hingga mencapai nilai puncak $27,66^\circ$. Nilai *steady state* rotor generator 841BG02 dan 841BG03 menjadi $20,23^\circ$ setelah gangguan.



Gambar 4.31. Respon frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 dan CB5-831MV082 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.30 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat mengalami gangguan hubung singkat pada bus 831MV082. Saat terjadi gangguan hubung singkat pada bus 831MV082 pada detik ke 2, frekuensi sistem naik mencapai 100,986%. Hal ini diakibatkan karena lepasnya CB5-831MV082 mengakibatkan hilangnya beban yang berada di bawah bus 831MV082 sehingga besarnya daya pembangkitan lebih besar dari daya yang dibutuhkan beban. Frekuensi mencapai kondisi *steady state* pada 100,38%. 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 4.32. Respon respon tegangan saat terjadi gangguan hubung singkat 3 pada bus 831MV082 dan CB5-831MV082 *open* untuk mengatasi gangguan

Pada gambar 4.31 dapat dilihat respon tegangan pada berbagai level tegangan. Nilai sebelum gangguan adalah 96,817%. Setelah terjadi hubung singkat 3 fasa pada bus 831MV082 maka didapatkan nilai terendah dicapai pada 62,326% dan nilai tertinggi dicapai pada nilai 108,361%. Kemudian sistem akan kembali stabil pada nilai 97,091%.

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

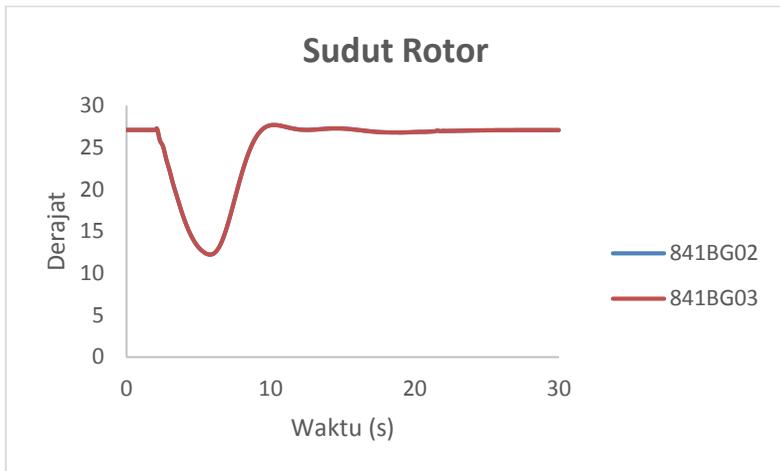
Dari hasil analisis respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus hubung singkat pada bus 831MV082.

4.4.5. Simulasi kestabilan transien untuk kasus *motor starting* pada Alternatif 2

Pada sub bab ini akan dianalisis hasil simulasi untuk kasus *motor starting* pada sistem kelistrikan Alternatif 2.

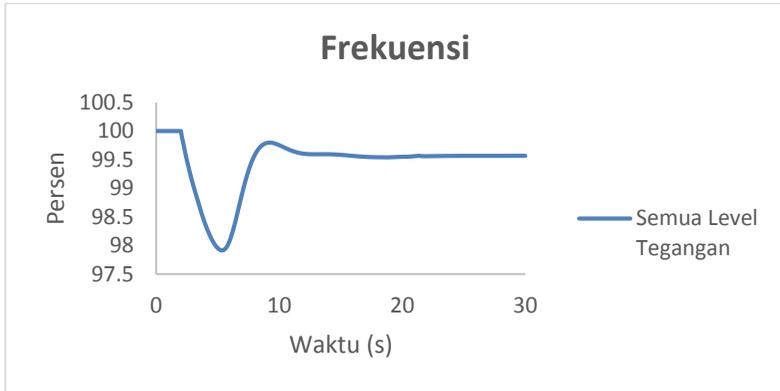
4.4.5.1. Studi kasus *Mstart: Motor 341FN01M01 7,1 MW starting (t=2 detik)*

Pada kasus ini akan ditampilkan respon sistem ketika motor 341FN01M01 *starting* pada detik ke 2. *Starting motor* dilakukan dengan metode rotor resistance sehingga simulasi dilakukan dengan memilih metode akselerasi rotor resistor. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.32, 4.33 dan 4.34.



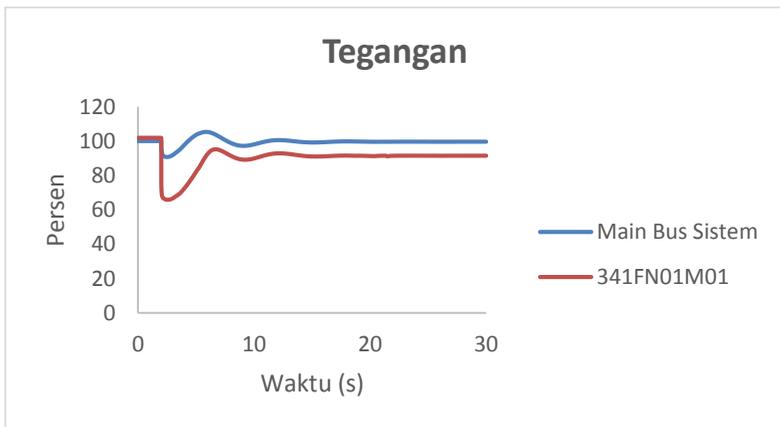
Gambar 4.33. Respon sudut rotor saat *motor starting* 341FN01M01

Pada gambar 4.32 dapat dilihat respon sudut rotor generator 841BG02 dan 841BG03. Sudut rotor 841BG02 dan 841BG03 saat sebelum gangguan 27,09°, saat terjadi gangguan turun hingga 12,22° dan mencapai kondisi *steady state* pada 27,09°.



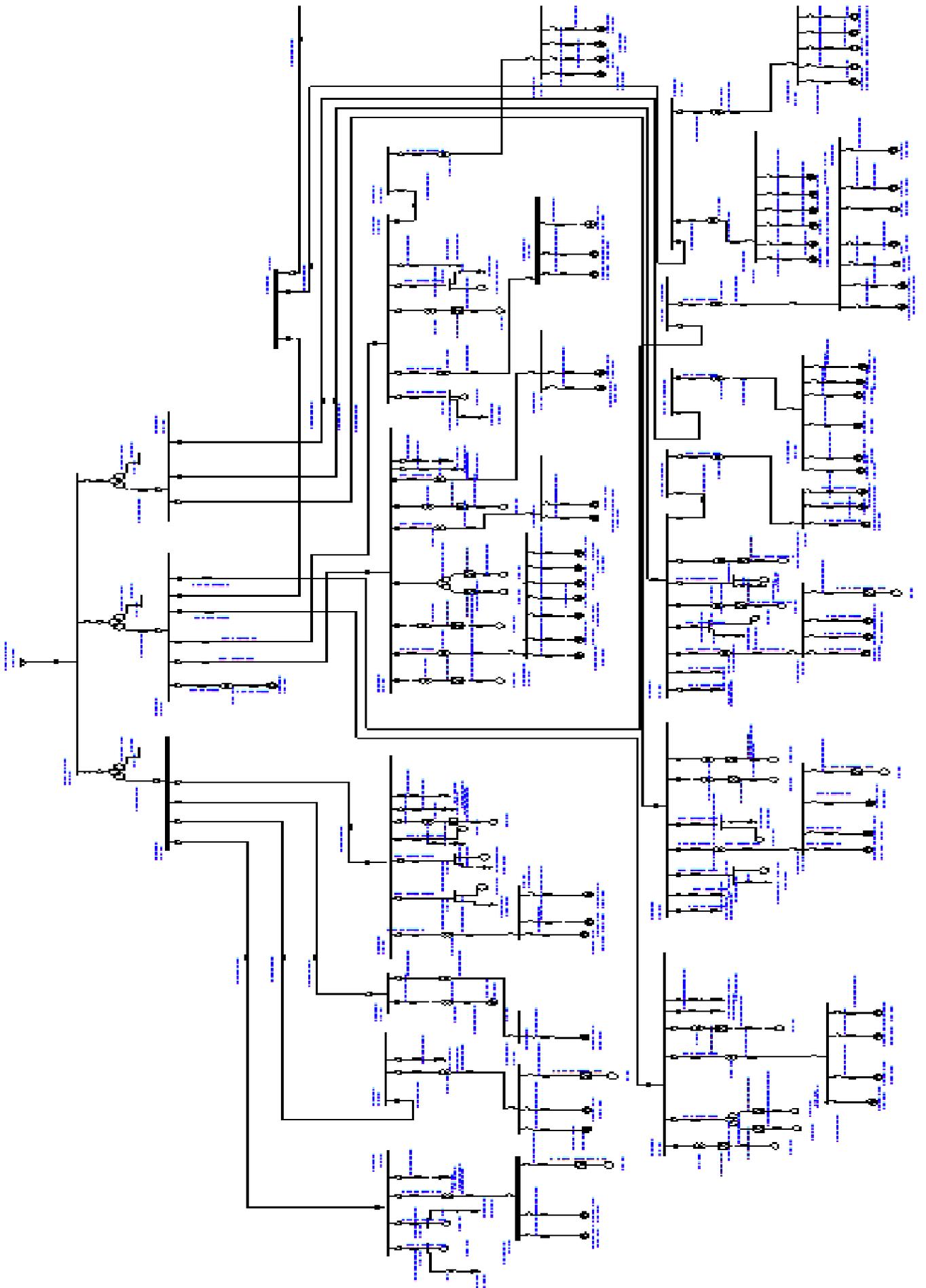
Gambar 4.34. Respon frekuensi saat *motor starting* 341FN01M01

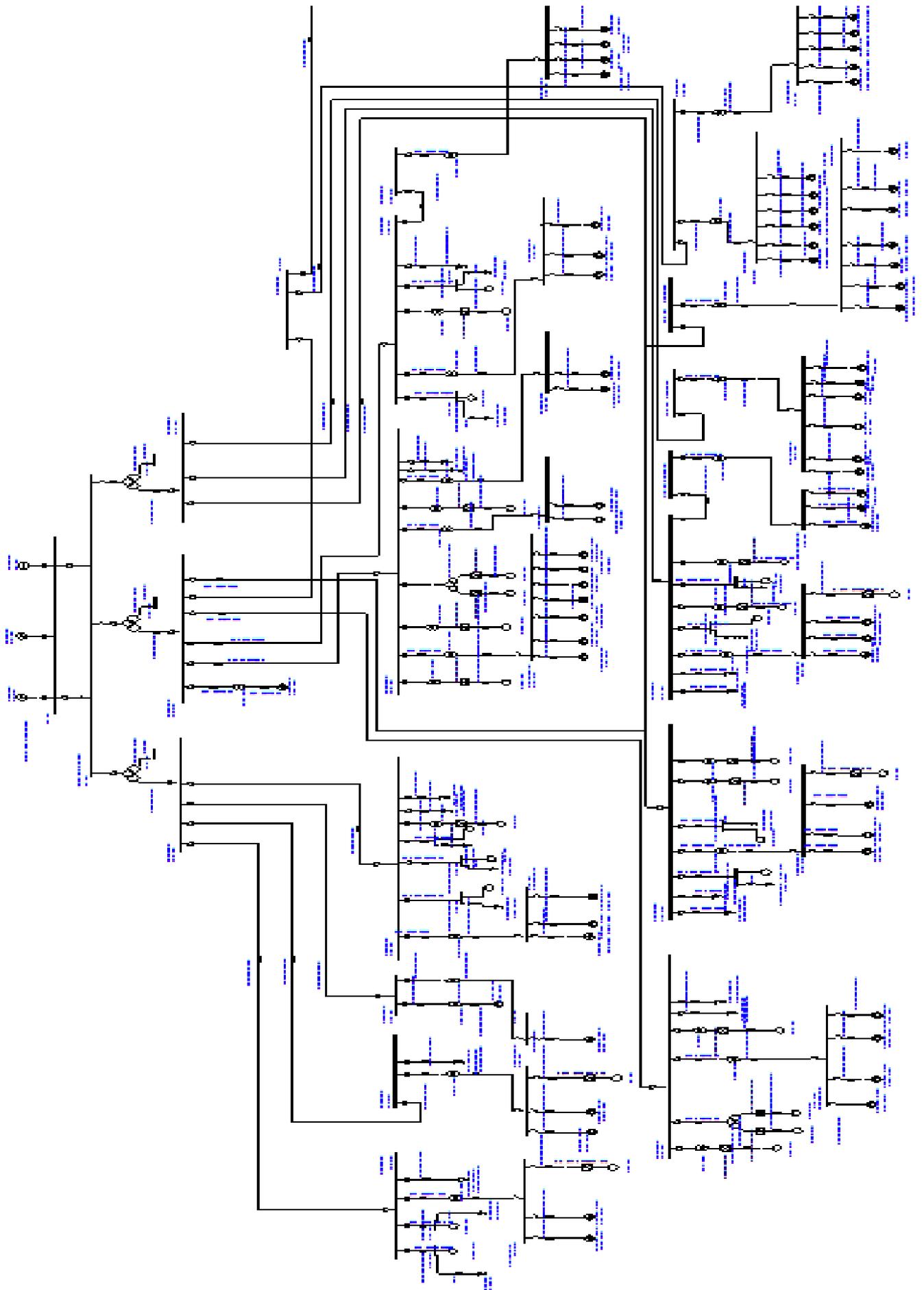
Pada gambar 4.33 dapat dilihat respon frekuensi sistem saat motor 341FN01M01 *starting*. Saat motor 341FN01M01 *starting* pada detik ke 2, frekuensi sistem turun mencapai 97,913%. Hal ini dikarenakan pada saat motor *starting*, motor menyerap daya yang sangat besar dalam beberapa detik. Frekuensi mencapai kondisi *steady state* pada 99,567%. 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 4.35. Respon tegangan bus motor saat *motor starting* 341FN01M01

Pada gambar 4.34 dapat dilihat respon tegangan pada saat motor 341FN01M01 *starting*. Pada bus 341FN01M01 nilai tegangan sebelum adanya *motor starting* 101,89%. Namun setelah terjadi *motor starting* pada detik ke 2 tegangan akan turun sampai 65,79% kemudian akan kembali *steady state* pada nilai 91,456%. 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 frekuensi dan tegangan sistem dapat disimpulkan sistem dapat kembali stabil untuk kasus *motor starting*.





Halaman ini sengaja dikosongkan

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 (841BG02) memerlukan pelepasan beban 2 tahap.
- Pada kasus hubung singkat sistem kelistrikan Alternatif 1 di level tegangan 6,3kV (831MV081), sistem tetap dalam keadaan stabil.
- Pada kasus hubung singkat sistem kelistrikan Alternatif 1 di level tegangan 0,4kV (831LV081), sistem tetap dalam keadaan stabil.
- Pada kasus hubung singkat sistem kelistrikan Alternatif 2 di level tegangan 0,4kV, setiap level tegangan nilai akan turun setelah terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada level tegangan 0,4kV, namun setelah CB1-831LV081 *open* maka nilai tegangan sesaat menjadi 99,513% dan akan kembali *steady state* pada 96,905%
- Pada kasus hubung singkat sistem kelistrikan Alternatif 2 di level tegangan 6,3kV, setiap level tegangan nilai akan turun setelah terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada level tegangan 6,3kV, namun setelah CB5-831MV081 *open* maka nilai tegangan sesaat menjadi 108,359% dan akan kembali *steady state* pada 97,09%
- Pada kasus *motor starting*, pada sistem kelistrikan Alternatif 1 penurunan tegangan terendah sempat pada 72,20% dan sistem kembali stabil pada 91,57% serta pada Alternatif 2 penurunan tegangan terendah sempat pada 65,79% dan sistem kembali stabil pada 91,456%.

5.2 SARAN

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

- Perlu dibedakan bus Generator 1 dengan yang lain agar dapat dilakukan studi kasus Hubung Singkat Bus level tegangan di bawah generator sehingga tidak mengakibatkan Bus generator lain mengalami gangguan.
- Pada kasus motor starting, perlu reschedule beban lain agar tegangan sistem pada saat motor start tidak terlalu besar mengalami jatuh tegangan.

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] Medina, Riscy. "Analisis Stabilitas Transien dan Perencanaan Pelepasan Beban pada PT. Semen Tonasa". Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2014.
- [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.

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



David Firdaus, dilahirkan di kabupaten Probolinggo, 21 September 1992. Anak kedua dari 3 bersaudara. Riwayat pendidikan berawal dari TK Taruna Dra.Zulaeha Probolinggo pada tahun 1998-1999. Kemudian melanjutkan ke SD Taruna Dra.Zulaeha pada tahun 1999-2005. Setelah itu melanjutkan pendidikannya ke SMP Taruna Dra. Zulaeha pada tahun 2005-2008 hingga setelah lulus diterima sebagai murid SMA Taruna Dra. Zulaeha pada tahun 2008 - 2011.

Pada tahun yang sama masuk ke Jurusan D3 Teknik Elektro Insutri - PENS hingga lulus tahun 2014. Kemudian melanjutkan studi Program Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya lewat program Lintas Jalur dan mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis dapat dihubungi melalui kontak email aing.davidfirdaus@gmail.com