

**ANALISIS STABILITAS *TRANSIENT* SISTEM TENAGA
LISTRIK PADA PT. KEBON AGUNG MALANG**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:
AGAM RIDO PRIAWAN
NIM. 105060307111030 - 63

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2014**

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS STABILITAS *TRANSIENT* SISTEM TENAGA LISTRIK
PADA PT. KEBON AGUNG MALANG**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

AGAM RIDO PRIAWAN

NIM. 105060307111030 - 63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Mahfudz Shidiq, M.T.

NIP.19580609 198703 1 003

Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 19730520 200801 1 013

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISIS STABILITAS *TRANSIENT* SISTEM TENAGA LISTRIK
PADA PT. KEBON AGUNG MALANG**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh:

AGAM RIDO PRIAWAN
NIM. 105060307111030 - 63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 12 November 2014

DOSEN PENGUJI

Ir. Teguh Utomo, M.T.
NIP.19650913 199103 1 003

Drs. Ir. Moch. Dhofir, M.T.
NIP. 19600701 199002 1 001

Ir. Soemarwanto, M.T.
NIP. 19500715 198003 1 002

Mengetahui

Ketua Jurusan Teknik Elektro

M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19741203 200012 1 001

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji syukur kehadirat Allah SWT karena hanya dengan rahmat, ridho, dan kasih sayang-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Analisis Stabilitas *Transient* Sistem Tenaga Listrik Pada PT. Kebon Agung Malang" dengan baik. Skripsi ini disusun dalam rangka untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik, di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Banyak kendala yang dihadapi penulis dalam penyelesaian skripsi ini. Namun kendala tersebut dapat diatasi berkat bantuan secara langsung maupun tidak langsung dari berbagai pihak. Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak tersebut diantaranya:

1. Bapak M. Aziz Muslim, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Ibu Dr. Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. selaku KKDK Teknik Energi Elektrik Teknik Elektro dan Bapak Mochammad Rif'an S.T., M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
3. Bapak Ir. Mahfudz Shidiq, M.T. dan Bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. selaku dosen pembimbing skripsi yang selalu membimbing dan mengarahkan dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Dosen dan karyawan Jurusan Teknik Elektro yang telah membantu segala urusan para penulis selama ini.
5. Kedua orang tua tercinta, Bapak Ir. Suharmadji, Ibu Wiwik Purworini, dan adik Betha Caesarrosita Sari yang senantiasa mendoakan, memberikan nasihat, kasih sayang, dan perhatian selama ini.
6. Bapak Nyoto selaku pembimbing lapangan dan Bapak Mujahidin selaku karyawan PT. Kebon Agung Malang.
7. Teman-teman mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya, khususnya keluarga besar Magnet'10 yang telah mendukung dan membantu selama proses pengerjaan skripsi.
8. Keluarga besar asisten dan mas Indra Setyawan S.ST. selaku Laboran Laboratorium Mesin Elektrik Universitas Brawijaya Malang.

9. Rekan-rekan Konsentrasi Teknik Energi Elektrik yang menjadi teman diskusi dalam pengerjaan skripsi ini.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.

Sekiranya Allah SWT mencatat amalan ikhlas kami dan semua pihak yang turut membantu sehingga skripsi ini terselesaikan. Akhirnya, saya menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna namun semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua. Amin.

Wassalammualaikum Wr. Wb.

Malang, 12 November 2014

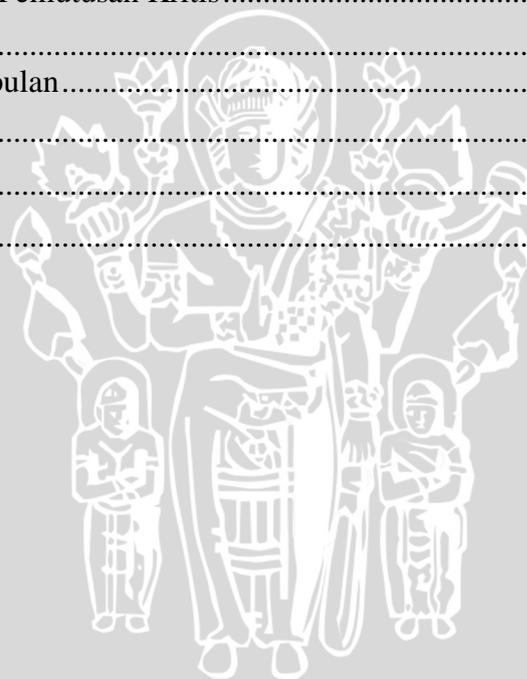
Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
ABSTRAK.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan.....	3
1.5 Manfaat.....	3
1.6 Sistematika Pembahasan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	5
2.2 Analisis Aliran Daya.....	5
2.3 Metode Aliran Daya.....	6
2.4 Sistem Per Unit.....	9
2.5 Stabilitas Sistem daya.....	9
2.6 Klasifikasi Stabilitas Sistem Daya.....	11
2.7 Stabilitas Sudut Rotor.....	12
2.8 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan.....	15
2.9 Hubungan Sudut-Daya.....	17
2.10 Stabilitas Tegangan.....	20
2.11 Stabilitas Frekuensi.....	20
2.12 Persamaan Transient.....	21
2.13 Metode Runge-Kutta.....	21
2.14 Generator Sinkron.....	25
2.15 Komputer Digital untuk Studi Kestabilan.....	25
2.16 Faktor yang Mempengaruhi Stabilitas Peralihan.....	26
BAB III METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Survei Kondisi Sistem dan Pengambilan Data.....	29
3.2 Pemodelan.....	29
3.3 Perhitungan dan Simulasi.....	29

3.4	Kesimpulan dan Saran.....	32
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....		33
4.1	Kondisi Kelistrikan di PT. Kebon Agung Malang	33
4.2	Pemodelan Sistem dan Pengolahan Data	34
4.3	Simulasi Aliran Daya	38
4.4	Rangkaian Ekuivalen Sistem.....	43
4.5	Persamaan Sudut Daya.....	46
4.6	Perhitungan dengan Metode Runge-Kutte	48
4.7	Representasi Saluran Transmisi	52
4.8	Simulasi Stabilitas Transien Kondisi 1.....	53
4.9	Simulasi Stabilitas Transien Kondisi 2.....	58
4.10	Simulasi Stabilitas Transien Kondisi 3.....	63
4.11	Perbandingan Stabilitas Sistem	68
4.12	Waktu Pemutusan Kritis.....	69
BAB V PENUTUP		72
5.1	Kesimpulan.....	72
5.2	Saran	72
DAFTAR PUSTAKA		73
LAMPIRAN.....		74



DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data parameter dinamik generator.....	35
Tabel 4.2 Data Saluran.....	36
Tabel 4.3 Data Beban.....	37
Tabel 4.4 Data beban tambahan.....	38
Tabel 4.5 Kondisi Sistem.....	38
Tabel 4.6 Data aliran daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 1	39
Tabel 4.7 Data aliran daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 2	40
Tabel 4.8 Data aliran daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 3	42
Tabel 4.9 Batas Tegangan pada Jaringan Transmisi.....	53
Tabel 4.10 Skenario gangguan kondisi 1	53
Tabel 4.11 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 1a.....	54
Tabel 4.12 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 1a.....	55
Tabel 4.13 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 2a.....	57
Tabel 4.14 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 2a.....	57
Tabel 4.15 Skenario gangguan kondisi 2.....	59
Tabel 4.16 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 1b.....	59
Tabel 4.17 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 1b.....	60
Tabel 4.18 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 2b.....	62
Tabel 4.19 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 2b.....	62
Tabel 4.20 Skenario gangguan kondisi 3	64
Tabel 4.21 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 1c.....	64
Tabel 4.22 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 1c.....	65
Tabel 4.23 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 2c.....	67
Tabel 4.24 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 2c.....	67

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik	5
Gambar 2.2 Tipikal Bus dari Sistem Tenaga	6
Gambar 2.3 Jenis-jenis Gangguan Hubung Singkat	11
Gambar 2.4 Klasifikasi Stabilitas Sistem Daya	12
Gambar 2.5 Osilasi daya (a) batas stabilitas rendah, dan (b) batas stabilitas besar	14
Gambar 2.6 Sudut rotor sebagai fungsi waktu.....	14
Gambar 2.7 Model sederhana dari generator yang terhubung ke infinite bus	18
Gambar 2.8 Hubungan Sudut-daya.....	19
Gambar 2.9 (a) Rangkaian mesin serempak kondisi peralihan (b) Diagram fasor mesin serempak kondisi peralihan	19
Gambar 2.10 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan peralihan.....	21
Gambar 2.11 Kurva penyelesaian persamaan differensial.....	22
Gambar 2.12 Estimasi waktu gangguan pada analisis stabilitas.....	26
Gambar 3.1 Diagram Alir Secara Keseluruhan	28
Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi	31
Gambar 4.1 Pemodelan PT. Kebon Agung sebelum penambahan kapasitas generator .	34
Gambar 4.2 Pemodelan PT. Kebon Agung setelah penambahan kapasitas generator....	34
Gambar 4.3 Pemodelan PT. Kebon Agung setelah penambahan kapasitas generator dan penambahan beban.....	35
Gambar 4.4 Rangkaian Ekuivalen Sistem saat Kondisi 2	43
Gambar 4.5 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.4 sebelum gangguan.....	44
Gambar 4.6 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.4 saat gangguan.....	44
Gambar 4.7 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.6.....	45
Gambar 4.8 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.7.....	45
Gambar 4.9 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.8.....	45

Gambar 4.10 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.4 setelah gangguan	46
Gambar 4.11 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 1a	54
Gambar 4.12 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 1a	55
Gambar 4.13 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 1a	56
Gambar 4.14 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 2a	56
Gambar 4.15 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 2a	57
Gambar 4.16 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 2a	58
Gambar 4.17 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1b	59
Gambar 4.18 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1b	60
Gambar 4.19 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1b	61
Gambar 4.20 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2b	61
Gambar 4.21 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2b	62
Gambar 4.22 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2b	63
Gambar 4.23 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1c	64
Gambar 4.24 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1c	65

Gambar 4.25 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1c 66

Gambar 4.26 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2c 66

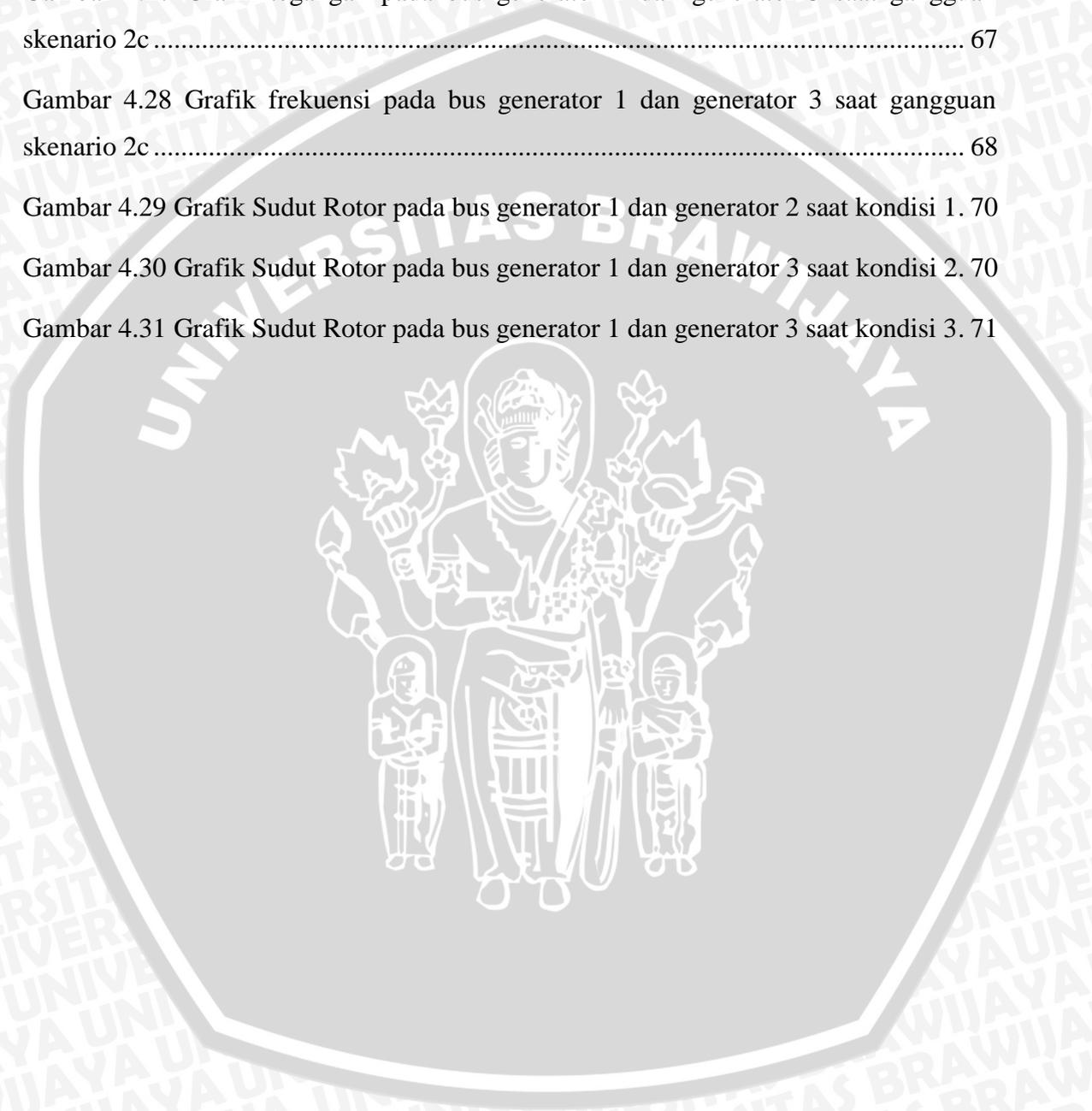
Gambar 4.27 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2c 67

Gambar 4.28 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2c 68

Gambar 4.29 Grafik Sudut Rotor pada bus generator 1 dan generator 2 saat kondisi 1. 70

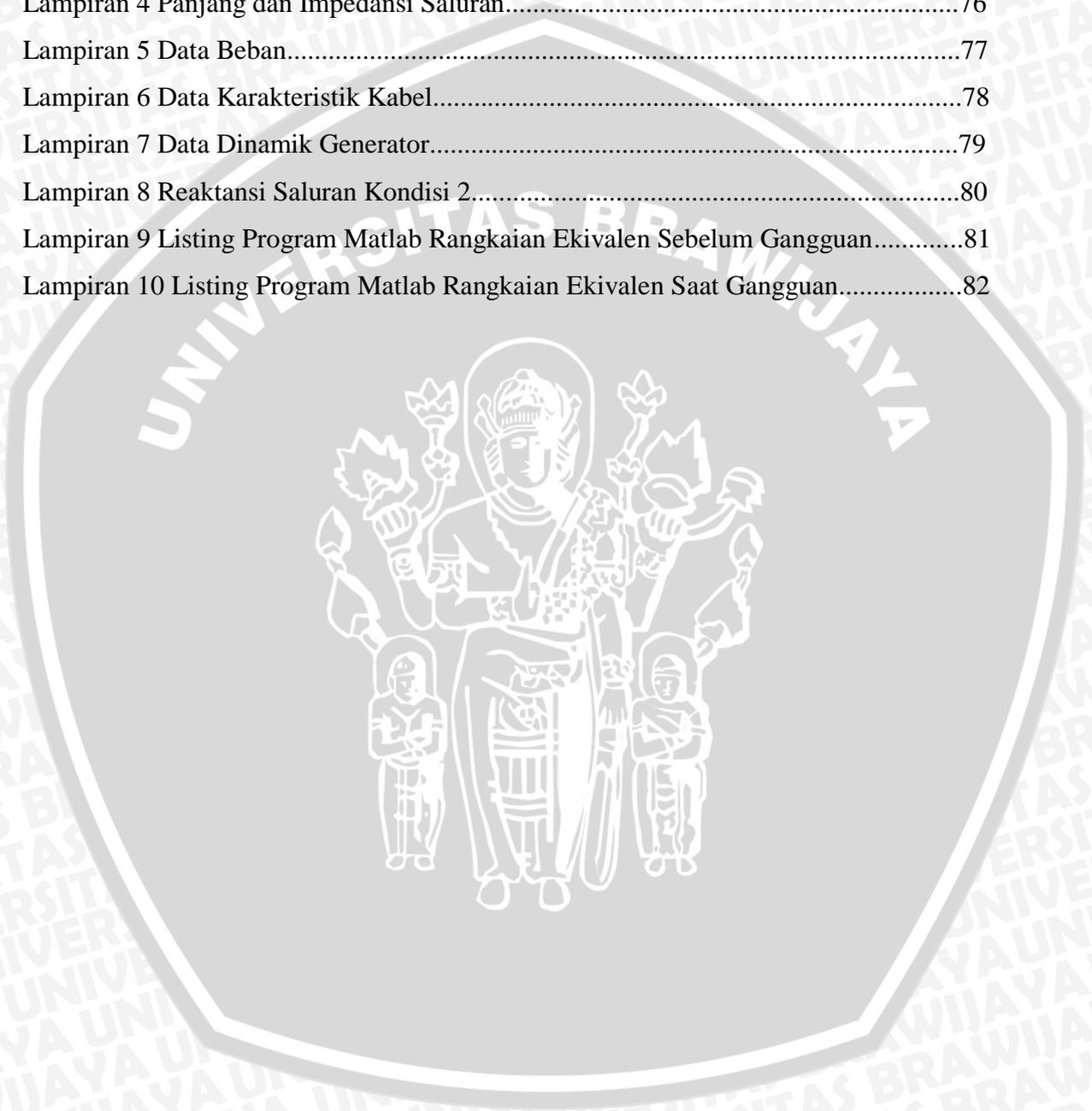
Gambar 4.30 Grafik Sudut Rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat kondisi 2. 70

Gambar 4.31 Grafik Sudut Rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat kondisi 3. 71



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Diagram Segaris PT. Kebon Agung Malang.....	73
Lampiran 2 Data Generator dan Transformator PT. Kebon Agung Malang.....	74
Lampiran 3 <i>Check List</i> Panel Listrik.....	75
Lampiran 4 Panjang dan Impedansi Saluran.....	76
Lampiran 5 Data Beban.....	77
Lampiran 6 Data Karakteristik Kabel.....	78
Lampiran 7 Data Dinamik Generator.....	79
Lampiran 8 Reaktansi Saluran Kondisi 2.....	80
Lampiran 9 Listing Program Matlab Rangkaian Ekuivalen Sebelum Gangguan.....	81
Lampiran 10 Listing Program Matlab Rangkaian Ekuivalen Saat Gangguan.....	82



ABSTRAK

Agam Rido Priawan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, November 2014, *Analisis Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik Pada PT. Kebon Agung Malang*, Dosen Pembimbing: Ir. Mahfudz Shidiq, M.T. dan Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D.

PT. Kebon Agung Malang adalah perusahaan yang bergerak dalam bidang produksi gula. Saat ini di PT. Kebon Agung Malang terdapat dua unit generator yang terpasang, yaitu generator dengan kapasitas 4,5 MW dan 1,7 MW. Pada tahun 2015, perusahaan tersebut berencana melakukan penambahan kapasitas generator dengan mengganti generator kapasitas 1,7 MW dengan generator berkapasitas 4,5 MW. Sehingga pada sistem yang baru tersebut terdapat dua unit generator yang masing-masing berkapasitas 4,5 MW. Dengan kondisi sistem baru tersebut maka sistem PT. Kebon Agung masih belum diketahui kestabilannya ketika terjadi gangguan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas *transient* yang meliputi kestabilan sudut rotor, tegangan dan frekuensi pada sistem kelistrikan PT. Kebon Agung saat sebelum dan setelah penambahan kapasitas generator.

Kestabilan sistem saat terjadi gangguan sangat perlu diketahui pada sistem yang baru. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi stabilitas yang meliputi kestabilan sudut rotor, tegangan dan frekuensi saat sebelum dan setelah penambahan kapasitas generator menggunakan *software* bantu. Selain itu akan disimulasikan pula waktu pemutusan kritis generator saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa.

Hasil simulasi sebelum penambahan kapasitas generator diperoleh, sistem dapat kembali ke kondisi normal saat gangguan hilang. Begitu pula pada sistem yang baru, menunjukkan sudut rotor, tegangan dan frekuensi dapat kembali ke kondisi normal saat gangguan dihilangkan. Waktu pemutusan kritis pada sistem PT. Kebon Agung setelah penambahan kapasitas generator lebih lama dibandingkan dengan sistem sebelum penambahan kapasitas generator. Pada saat sebelum penambahan kapasitas generator, waktu pemutusan kritis generator adalah 0,19 detik. Sedangkan pada kondisi setelah penambahan kapasitas generator, waktu pemutusan kritis generator adalah 1,3 detik.

Kata kunci : stabilitas *transient*, sudut rotor, tegangan, frekuensi, waktu pemutusan kritis, sistem kebon agung.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan energi sekunder yang banyak dimanfaatkan oleh berbagai sektor, salah satunya adalah sektor industri. Dalam sektor industri banyak menggunakan mesin-mesin dan berbagai macam peralatan listrik yang memerlukan input daya listrik yang besar. Penyediaan daya listrik yang ada pada saat ini disediakan oleh PT. PLN (Persero). Namun, tidak semua sumber daya listrik yang digunakan oleh industri berasal dari PLN. Sumber listrik lainnya berasal dari pembangkit listrik sendiri yang dimiliki oleh sebuah industri yang biasanya merupakan pembangkit dengan tenaga uap. Listrik yang berasal dari pembangkit listrik memegang peranan penting dalam proses produksi pada industri. Tidak menutup kemungkinan bahwa suatu industri menambah kapasitas generator pembangkit listriknya untuk peningkatan proses produksi atau untuk peremajaan alat. Permasalahan tersebut terjadi di PT. Kebon Agung Malang yang menambah kapasitas generator pembangkitnya.

PT. Kebon Agung Malang adalah perusahaan yang bergerak dalam produksi gula. PT. Kebon Agung berdiri tahun 1905, sejak didirikan dengan kapasitas giling terpasang 1.500 ton/tahun (tth). Dari tahun 2001 hingga 2004 dilakukan perbaikan dan penggantian mesin untuk meningkatkan kemantapan kinerja dan efisiensi pabrik dengan sasaran kapasitas giling 5.000 tth. Sejak tahun 2005 PT Kebon Agung melakukan Program Pengembangan PT Kebon Agung dengan sasaran kapasitas giling 5.750 tth.

PT. Kebon Agung Malang memiliki dua unit generator pembangkit yang aktif, masing-masing berkapasitas 4,5 MW dan 1,7 MW. Pembangkit tersebut digunakan untuk memasok kebutuhan beban listrik yang ada pada perusahaan tersebut. PT. Kebon Agung Malang memiliki lima stasiun pengolahan tebu, antara lain stasiun listrik, stasiun ketel, stasiun gilingan, stasiun tengah dan stasiun puteran. Stasiun puteran memiliki tujuh panel beban dengan 3 panel diantaranya dipasok oleh PLN, sedangkan sumber listrik stasiun yang lain dipasok oleh dua unit generator pembangkit. Pada tahun 2015 PT. Kebon Agung berencana melakukan peremajaan unit generator dengan mengganti generator kapasitas 1,7 MW dengan generator berkapasitas 4,5 MW. Spesifikasi dari generator baru tersebut sama dengan generator 4,5 MW yang telah terpasang. Dengan kondisi sistem baru maka sistem PT. Kebon Agung Malang masih belum diketahui kestabilannya ketika terjadi gangguan.

Salah satu masalah dalam sistem tenaga listrik adalah kestabilan. Kestabilan sistem tenaga dengan komponen-komponen dinamisnya adalah kemampuan sistem tersebut untuk kembali kepada operasi normal atau stabil setelah mengalami gangguan. Karena itu tanggapan sistem selama peralihan yang mengikuti suatu gangguan harus diredam dan diselesaikan dalam selang waktu tertentu agar tetap dapat dikatakan stabil. Penyebab dari ketidakstabilan tersebut adalah gangguan-gangguan, perubahan-perubahan beban dalam tingkat dan waktu tertentu. Jadi kestabilan sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh pembangkit, jenis gangguan maupun koordinasi beban.

Stabilitas transien berhubungan dengan gangguan besar secara tiba-tiba seperti gangguan hubung singkat dan pemutusan saluran secara tiba-tiba melalui *Circuit Breaker* (CB). Apabila gangguan besar terjadi dan tidak segera dihilangkan, maka percepatan atau perlambatan sudut rotor akan terjadi dan dapat mengakibatkan generator lepas sinkron. Dalam studi stabilitas transien, waktu yang dipandang hanya kira-kira 1 detik, dengan demikian cukup singkat sehingga pengaruh-pengaruh dari *governor* dan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) biasanya diabaikan karena dalam waktu yang singkat tersebut masih dianggap tidak bekerja. Keadaan inilah yang paling baik untuk keperluan operasi maupun perencanaan. Analisis stabilitas transien merupakan evaluasi kemampuan sistem tenaga untuk menahan gangguan besar dan untuk bertahan dari kondisi peralihan ke kondisi operasi normal. Studi kestabilan transien diperlukan untuk memastikan kemampuan sistem untuk bisa menahan kondisi transien setelah gangguan besar. Seringkali, studi tersebut dilakukan ketika terjadi pemasangan fasilitas transmisi maupun pembangkit yang baru. Hal ini sangat membantu dalam hal menentukan sistem rele yang diperlukan, waktu kritis pemutusan breaker, level tegangan dan kemampuan transfer antara sistem.

Gangguan hubung singkat sangat mempengaruhi stabilitas dari sistem kelistrikan pada industri. Sehingga pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis stabilitas transien sistem tenaga listrik pada PT. Kebon Agung Malang dengan menganalisis karakteristik mesin yaitu kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi dan kestabilan sudut rotor ketika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa pada salah satu bus.

1.2 Rumusan Masalah

Mengacu pada latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang akan di bahas pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana stabilitas sudut rotor, tegangan dan frekuensi di PT. Kebon Agung Malang saat terjadi gangguan hubung singkat sebelum penambahan kapasitas generator.
2. Bagaimana stabilitas sudut rotor, tegangan dan frekuensi di PT. Kebon Agung Malang saat terjadi gangguan hubung singkat setelah penambahan kapasitas generator.
3. Bagaimana waktu pemutusan kritis generator di PT. Kebon Agung Malang.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diajukan dalam penelitian ini antara lain:

1. Sistem kelistrikan yang dibahas adalah sistem kelistrikan PT. Kebon Agung Malang.
2. Gangguan yang terjadi adalah gangguan hubung singkat tiga fasa.
3. Tidak dibahas masalah sistem proteksi.
4. Dalam analisis dan simulasi hanya melakukan gangguan pada salah satu bus.
5. Parameter yang dianalisis adalah tegangan, sudut rotor dan frekuensi.
6. Desain dan simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak PSSE (*Power System Simulator For Engineering*).

1.4 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui stabilitas *transient* yang meliputi kestabilan sudut rotor, tegangan dan frekuensi pada sistem kelistrikan PT. Kebon Agung Malang saat sebelum dan setelah penambahan kapasitas generator pembangkit.

1.5 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai bahan kajian kepada PT. Kebon Agung Malang mengenai stabilitas *transient* sistem tenaga listrik pada saat sebelum dan setelah penambahan kapasitas generator yang disimulasikan menggunakan perangkat lunak.

1.6 Sistematika Pembahasan

Sistematika pembahasan yang digunakan dalam penyusunan laporan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- BAB I** : Pada bab ini memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, manfaat dan sistematika pembahasan.
- BAB II** : Berisi tinjauan pustaka yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan mencakup teori stabilitas transien.
- BAB III** : Berisi penjelasan tentang metode penelitian yang akan dilakukan, terdiri dari obyek penelitian, studi literatur, survey lapangan, pengumpulan data, analisis, simulasi serta penarikan kesimpulan.
- BAB IV** : Berisi perhitungan, pengolahan data, pemodelan sistem dan analisis terhadap masalah yang diajukan dalam penelitian dengan memperhatikan data hasil analisis yang diperoleh.
- BAB V** : Berisi kesimpulan dari penelitian serta saran dari penulis untuk penelitian selanjutnya.

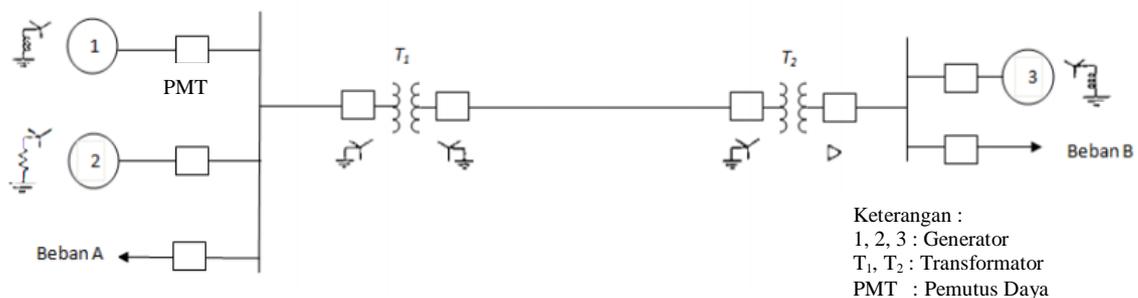


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah rangkaian sistem yang terdiri dari pembangkit listrik, saluran transmisi dan sistem distribusi yang dioperasikan secara serentak dalam rangka penyediaan tenaga listrik.

Komponen dasar yang membentuk sistem tenaga listrik adalah generator, transformator, saluran transmisi dan beban. Dalam menganalisis sistem tenaga diperlukan diagram yang dapat mewakili setiap komponen sistem tenaga listrik. Diagram yang selalu digunakan adalah diagram satu garis seperti Gambar 2.1 di bawah.



Gambar 2.1 Diagram Satu Garis Sistem Tenaga Listrik

Sumber : Stevenson, 1990:149

2.2 Analisis Aliran Daya

Studi aliran daya merupakan hal penting dalam desain dan perencanaan pengembangan sistem daya guna menentukan operasi terbaik pada sistem. Keterangan utama yang diperoleh dari sebuah studi aliran daya adalah besar dan sudut fasa tegangan, daya reaktif, daya aktif yang dibangkitkan generator dan daya aktif dan reaktif yang mengalir pada setiap saluran/cabang. Studi ini juga digunakan untuk mengevaluasi sistem tenaga listrik terhadap pengaruh kondisi pembebanan yang berbeda. Studi-studi seperti hubung singkat, stabilitas, pembebanan ekonomis juga memerlukan studi aliran daya terlebih dahulu.

Setiap titik/bus pada suatu sistem tenaga listrik terdapat daya aktif P , daya reaktif Q , tegangan E , dan sudut fasa tegangan δ . Jadi pada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P , Q , E dan δ . Di dalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui, dan dua yang lain perlu dicari. Berdasarkan hal tersebut di atas, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan bus berayun (*slack bus*). (Grainger & Stevenson, 1994:332)

- Bus beban (*P-Q bus*)

Pada bus ini, selisih daya antara daya yang dibangkitkan oleh generator dan daya yang diserap oleh beban diketahui nilainya.

- Bus generator (*P-V bus*)

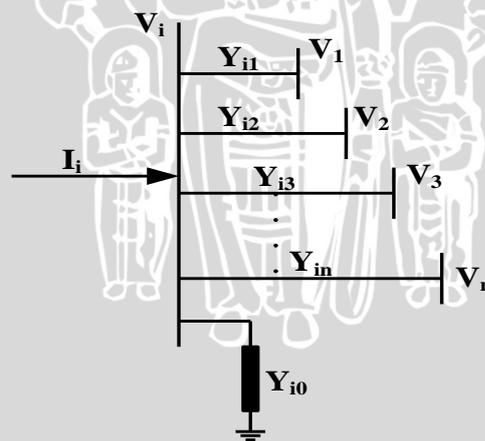
Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan daya aktif P, sedangkan yang tidak diketahui adalah sudut fasa tegangan dan daya reaktif Q.

- Bus berayun (*Slack bus*)

Komponen yang diketahui dalam bus ini adalah besar tegangan dan sudut fasa, sedangkan yang tidak diketahui adalah daya aktif P dan daya reaktif Q. Dalam studi aliran daya hanya terdapat satu bus berayun.

2.3 Metode Aliran Daya

Dalam menganalisa sistem jaringan yang memiliki lebih dari satu sumber listrik ataupun pada sistem jaringan kompleks maka diperlukan suatu metode analisa daya yang sesuai untuk memudahkan perhitungan. Oleh karena itu, untuk mempermudah perhitungan akan digunakan metode Newton-Raphson (Hadi Saadat, 1999:232).



Gambar 2.2 Tipikal Bus dari Sistem Tenaga
Sumber : Saadat, 1999:209

Dalam metode ini persamaan aliran daya dirumuskan dalam bentuk polar. Dari Gambar 2.2, arus yang memasuki bus i dapat dicari dengan menggunakan persamaan (Hadi Saadat, 1999:232):

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (2-1)$$

Dari Persamaan (2-1) diatas, apabila diubah dalam bentuk polar akan didapatkan Persamaan (2-2):

$$I_i = \sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j \quad (2-2)$$

Dengan $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ dan δ_j adalah sudut tegangan pada bus j.

Persamaan daya kompleks pada bus-i yaitu:

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (2-3)$$

Persamaan (2-2) dapat disubstitusikan kedalam persamaan (2-3) sehingga menghasilkan:

$$P_i - jQ_i = (|V_i| \angle -\delta_i) (\sum_{j=1}^n |Y_{ij}| |V_j| \angle \theta_{ij} + \delta_j) \quad (2-4)$$

Sehingga apabila bagian real dan imajiner pada persamaan diatas dipisahkan, maka didapatkan persamaan berikut:

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-5)$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-6)$$

Dengan I_i adalah arus pada bus i, V_i merupakan tegangan pada bus i, V_j merupakan tegangan pada bus j, Y_{ij} adalah admitansi antara bus i dan j, P_i adalah daya aktif pada bus i, Q_i adalah daya reaktif pada bus i, θ_{ij} adalah sudut polar admitansi Y_{ij} , dan δ_j merupakan sudut tegangan V_j .

Dari kedua persamaan diatas, yaitu persamaan (2-5) dan (2-6) dikembangkan dengan deret Taylor seperti pada persamaan dibawah ini (Hadi Saadat, 1999:233) :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

Pada permasalahan ini, dimisalkan bahwa bus 1 adalah *slack bus*. Matriks Jacobian memberikan perbandingan linier antara perubahan sudut tegangan $\Delta \delta_i^{(k)}$ dan besar tegangan $\Delta |V_i^{(k)}|$ dan dengan perubahan pada daya aktif ($\Delta P_i^{(k)}$) dan daya reaktif

$(\Delta Q_i^{(k)})$, sehingga dalam bentuk singkat dapat ditulis seperti pada persamaan dibawah ini (Hadi Saadat, 1999:233) :

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

Elemen untuk J_1 yaitu:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-9)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-10)$$

Elemen untuk J_2 yaitu:

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i| |Y_{ii}| \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-11)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-12)$$

Elemen untuk J_3 yaitu:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{j \neq i} |V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-13)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| |V_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-14)$$

Elemen untuk J_4 yaitu:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_i| |Y_{ii}| \sin(\theta_{ii}) - \sum_{j \neq i} |V_j| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (2-15)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = -|V_i| |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j), \quad j \neq i \quad (2-16)$$

Pada penjelasan diatas diketahui bahwa nilai harga $\Delta P_i^{(k)}$ dan $\Delta Q_i^{(k)}$ berbeda antara yang terjadwal dengan nilai perhitungan, maka ini disebut dengan sisa daya (*power residuals*) yang diberikan dengan:

$$\Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \quad (2-17)$$

$$\Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \quad (2-18)$$

Perhitungan baru untuk sudut fasa dan tegangan bus adalah:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (2-19)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta|V_i^{(k)}| \quad (2-20)$$

2.4 Sistem Per Unit

Saluran transmisi tenaga dioperasikan pada tingkat tegangan dimana kilovolt merupakan unit yang sangat memudahkan untuk menyatakan tegangan. Karena besarnya daya yang harus disalurkan dengan satuan kilowatt atau megawatt dan kilovolt-ampere atau megavolt-ampere adalah istilah-istilah yang sudah biasa dipakai. Misalnya, jika sebagai tegangan dasar dipilih 120 kV, maka tegangan-tegangan sebesar 108, 120 dan 126 kV berturut-turut menjadi 0,90, 1,00 dan 1,05. Definisi nilai per unit untuk suatu kuantitas ialah perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya yang dinyatakan dalam desimal (Stevenson, 1990:29).

Apabila pada tegangan dan daya yang digunakan adalah tegangan dan daya 3 fasa, maka perhitungan nilai dasar menggunakan rumus-rumus berikut (Stevenson, 1990:31):

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kV_{LL}/\sqrt{3})^2 \times 1000}{kVA_{3\phi}/3 \text{ dasar}} \quad (2-21)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kV_{LL})^2 \times 1000}{kVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2-22)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar, } kV_{LL})^2}{MVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2-23)$$

2.5 Stabilitas Sistem daya

Stabilitas sistem daya didefinisikan sebagai sifat sistem yang memungkinkan generator bergerak sinkron dalam sistem dan bereaksi terhadap gangguan dalam keadaan kerja normal serta kembali ke kondisi kerja semula (keseimbangan) bila keadaan menjadi normal kembali (Kundur, 1994:17).

Komponen-komponen dari sistem tenaga listrik memberikan keseimbangan dan saling mempengaruhi antara satu dengan yang lain pada keadaan operasi normal. Ketika terjadi perubahan mendadak dalam sistem maka akan terjadi ayunan atau osilasi yang berdampak pada kinerja mesin-mesin. Dari perubahan mendadak ini akan ada dua hal kemungkinan yang terjadi, yaitu sistem akan tetap kembali stabil atau sistem akan

mengalami osilasi yang terus menerus sampai membuat kegagalan total (*black out*). Dengan kata lain perbedaan kondisi komponen-komponen sistem tenaga listrik ini tidak bisa mengembalikan pada posisi serempak. Kemampuan komponen-komponen pada sistem tenaga listrik dalam memberikan keseimbangan disebut kestabilan.

Masalah kestabilan biasanya diklasifikasikan menjadi tiga tipe bergantung pada sifat dan besar gangguan, yaitu (Robert H.Miller & James H.Malinowski, 1994:214) :

1. Stabilitas *Steady-State* Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan *Steady-State* merupakan keadaan dimana sistem tenaga mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi sebelum terjadi gangguan setelah sistem mengalami gangguan kecil. Analisis kestabilan *steady-state* menggunakan pendekatan model linier. Kestabilan *steady-state* pada sistem tenaga dapat disebut kestabilan sinyal kecil (*small signal stability*). Stabilitas *steady-state* bergantung kepada kapasitas pembangkitan dan efektifitas perangkat kontrol otomatis, terutama untuk regulator tegangan otomatis (AVR) pada generator (Robert H.Miller & James H.Malinowski, 1994:214).

2. Stabilitas *Transient* Sistem Tenaga Listrik

Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan atau beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam itu stabilitas *transient* harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan (*shock*) atau perubahan beban yang relatif besar yang terjadi. Stabilitas *transient* adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron (sebelum terjadi aksi dari kontrol *governor*) yang mengikuti gangguan pada sistem (Robert H.Miller & James H.Malinowski, 1994:215).

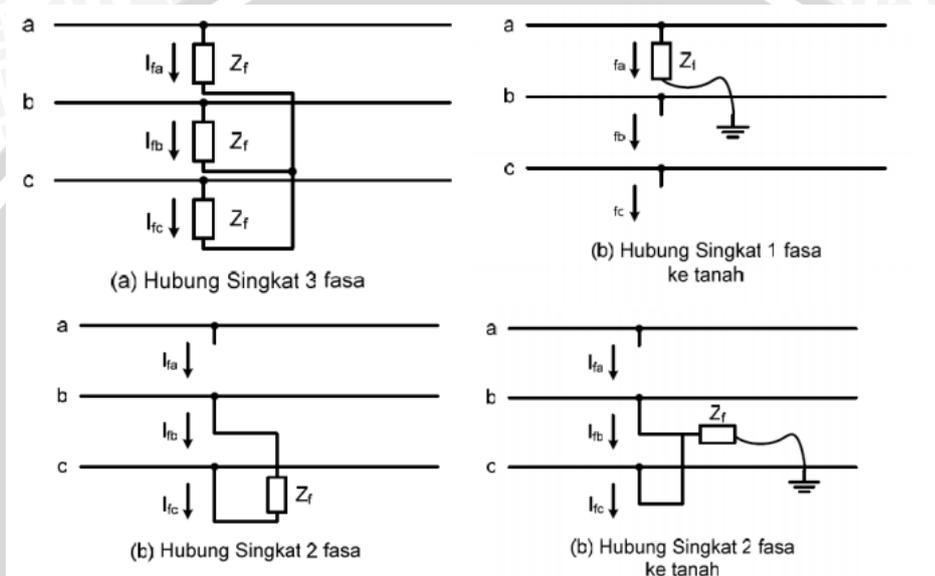
Pada umumnya ayunan pertama pada rotor mesin akan terjadi selama satu detik setelah gangguan, tetapi waktu yang sebenarnya bergantung pada karakteristik mesin dan sistem transmisi. Setelah periode ini, *governor* akan mulai bereaksi, biasanya sekitar 4 hingga 5 detik, dan stabilitas dinamis akan efektif.

3. Stabilitas Dinamis Sistem Tenaga Listrik

Beberapa waktu setelah gangguan, *governor* pada *prime mover* akan bereaksi untuk menaikkan atau menurunkan energi input, sesuai kondisi yang terjadi, untuk mengembalikan keseimbangan antara energi input dan beban listrik yang ada. Hal ini biasanya terjadi sekitar satu hingga satu setengah detik setelah terjadi gangguan. Periode ketika *governor* mulai bereaksi dan waktu ketika kestabilan mencapai kondisi *steady-state* adalah periode ketika karakteristik kestabilan dinamik mulai

efektif. Stabilitas dinamis adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron setelah ayunan pertama (periode stabilitas *transient*) hingga sistem mencapai kondisi *steady-state* yang baru (Robert H. Miller & James H. Malinowski, 1994:216).

Dalam suatu operasi sistem daya, ada kalanya sistem mengalami gangguan hubung singkat yang dapat menyebabkan sistem tidak beroperasi secara seimbang. Adapun gangguan-gangguan hubung singkat pada sistem tiga fasa dapat ditunjukkan pada Gambar 2.3.



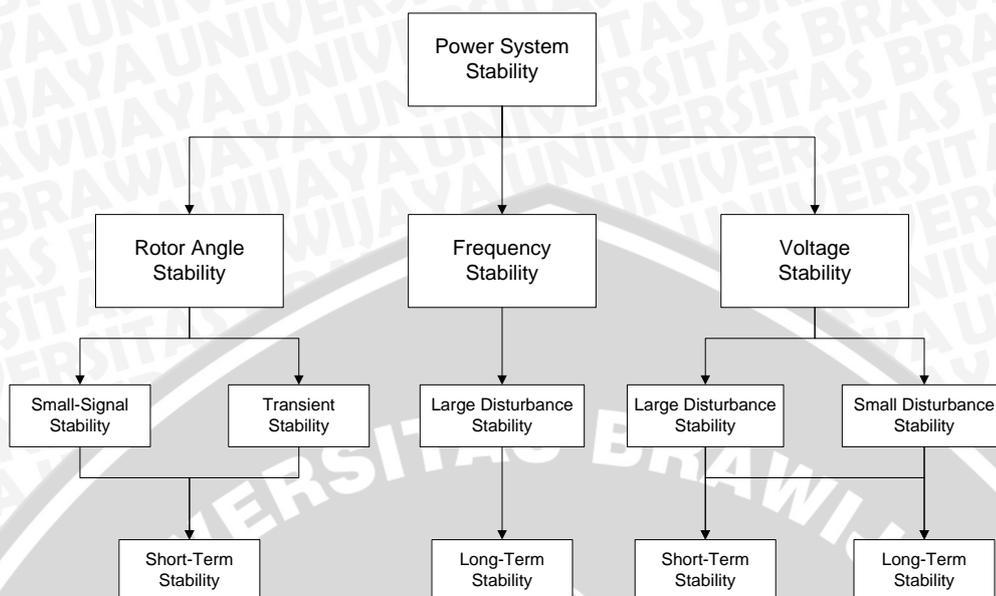
Gambar 2.3 Jenis-jenis Gangguan Hubung Singkat
Sumber : Grainger, 1994:478

2.6 Klasifikasi Stabilitas Sistem Daya

Ketidakstabilan sistem daya didapatkan dalam berbagai bentuk dan dipengaruhi oleh berbagai faktor. Analisis masalah stabilitas, termasuk identifikasi faktor-faktor penting yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan dan merancang metode untuk meningkatkan operasi stabilitas dapat difasilitasi oleh klasifikasi stabilitas ke dalam kategori yang tepat sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Hal ini didasarkan pada pertimbangan sebagai berikut (Kundur, 1994:35):

1. Sifat fisik dari ketidakstabilan yang dihasilkan terkait dengan parameter tentang ketidakstabilan pada sistem utama yang dapat diamati.
2. Ukuran gangguan dapat menunjukkan metode yang paling tepat untuk perhitungan dan prediksi stabilitas.

3. Perangkat, proses, dan rentang waktu yang harus dipertimbangkan dalam rangka menentukan stabilitas.



Gambar 2.4 Klasifikasi Stabilitas Sistem Daya

Sumber : Kundur, 1994:36

2.7 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor merupakan kemampuan mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada suatu sistem untuk tetap sinkron dalam kondisi operasi normal dan setelah mengalami gangguan (Grigsby, 2007:7.5). Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik dari setiap mesin sinkron dalam suatu sistem. Ketidakstabilan pada bentuk ini dapat mengakibatkan terjadinya peningkatan besarnya sudut ayunan beberapa generator yang menyebabkan mereka kehilangan sinkronisasi dengan generator lainnya.

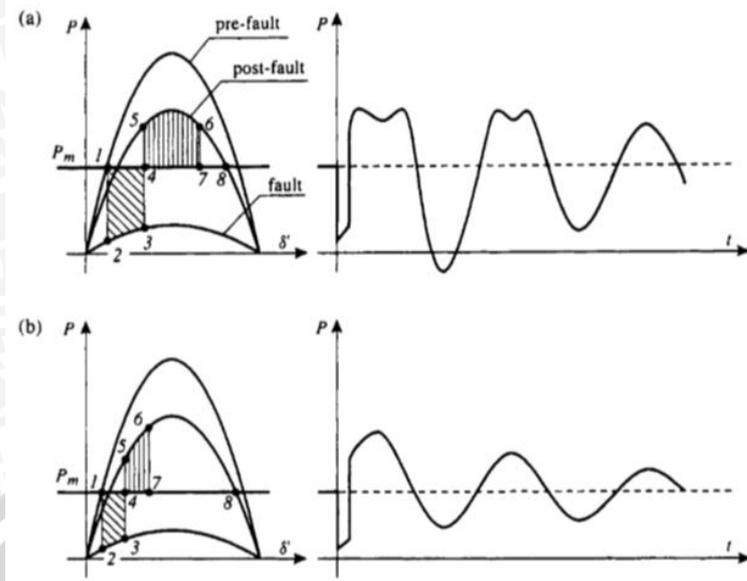
Hubungan sudut daya sangat nonlinier. Jika melebihi batas tertentu, peningkatan pemisahan sudut akan disertai oleh penurunan transfer daya, meningkatnya pemisahan sudut lebih lanjut dapat menyebabkan ketidakstabilan. Untuk setiap situasi tertentu, stabilitas sistem tergantung pada apakah ada atau tidak penyimpangan yang menghasilkan posisi sudut rotor yang cukup untuk mengembalikan torsi. Perubahan torsi listrik mesin sinkron akibat gangguan dapat diselesaikan menjadi dua komponen (Grigsby, 2007:7.6).

- komponen torsi sinkronisasi, dalam fase dengan gangguan sudut rotor.
- komponen torsi redaman, dalam fase dengan penyimpangan kecepatan.

Stabilitas sistem daya tergantung pada keberadaan kedua komponen torsi di atas untuk masing-masing mesin sinkron. Kurangnya torsi sinkronisasi akan menghasilkan ketidakstabilan yang tidak periodik atau *non-osilasi*, sedangkan kurangnya torsi redaman akan menghasilkan ketidakstabilan yang *berosilasi*. Untuk kemudahan dalam analisis dan untuk memperoleh informasi yang bermanfaat mengenai sifat dari masalah stabilitas, maka penting untuk mengkarakterisasikan stabilitas sudut rotor dalam dua kategori berikut (Grigsby, 2007:7.6):

1. Sinyal kecil (*steady-state*) stabilitas yang berkaitan dengan kemampuan sistem daya untuk mempertahankan sinkronisasi terhadap adanya gangguan kecil. Gangguan dianggap cukup kecil yang linier terhadap persamaan sistem diperbolehkan untuk tujuan analisis. Ketidakstabilan yang mungkin dihasilkan terdiri dari dua bentuk:
 - i) peningkatan sudut rotor tanpa osilasi atau tidak periodik karena kurangnya torsi sinkronisasi,
 - ii) berkurangnya amplitudo osilasi rotor karena kurangnya torsi redaman yang cukup.
2. Stabilitas sudut rotor pada gangguan besar atau stabilitas peralihan, seperti sering disebut, ada kaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan peralihan. Ketidakstabilan ini dalam bentuk non-periodik karena torsi cukup untuk melepas sinkronisasi, dan disebut sebagai stabilitas ayunan pertama. Dengan besaran - besaran sistem daya, ketidakstabilan peralihan mungkin tidak selalu terjadi sebagai ketidakstabilan ayunan pertama yang terkait dengan mode tunggal, melainkan sebagai akibat dari penyimpangan puncak yang meningkat disebabkan oleh beberapa superposisi mode osilasi yang melebihi besar sudut ayunan pertama rotor. Kerangka waktu dalam studi stabilitas peralihan biasanya terbatas pada 3-5 detik.

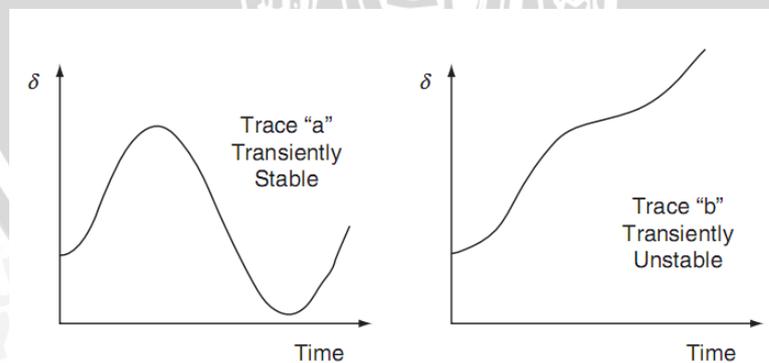
Osilasi rotor yang mengiringi suatu gangguan juga menghasilkan osilasi pada daya yang dihasilkan. Kondisi dari variasi daya dapat menjadi sumber yang berguna untuk melakukan pendekatan dan sebagai informasi tentang batas stabilitas peralihan. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 Osilasi daya (a) batas stabilitas rendah, dan (b) batas stabilitas besar
Sumber : Machowski, 2008:216

Gambar 2.6 menjelaskan mengenai gangguan generator pada suatu sistem yang menunjukkan bahwa sudut rotor generator pulih dan berosilasi di sekitar titik keseimbangan baru seperti pada grafik 'a' atau meningkat secara tidak periodik seperti grafik 'b'. Grafik yang pertama ini dianggap kondisi peralihan yang stabil, dan kondisi grafik yang kedua disebut kondisi peralihan yang tidak stabil.

Dua konsep penting dalam memahami stabilitas peralihan adalah: (i) persamaan ayunan dan (ii) hubungan daya-sudut (Grigsby, 2007:8.2). Untuk menjelaskan hal ini dapat digunakan kriteria sama luas, yaitu pendekatan grafis yang sederhana untuk menilai stabilitas peralihan.



Gambar 2.6 Sudut rotor sebagai fungsi waktu
Sumber : Grigsby, 2007:8.2

2.8 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen-putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali momen kelembaman (momen inersia) rotor dengan percepatan sudutnya.

Persamaannya dapat ditulis sebagai (Stevenson, 1990:351) :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{ Nm} \quad (2-24)$$

dimana : J adalah momen kelembaman motor

θ_m adalah pergeseran sudut rotor terhadap sumbu diam (radian)

t adalah waktu dalam detik

T_m adalah momen putaran mekanis poros penggerak yang diberikan penggerak mula dikurangi dengan rugi-rugi (Nm)

T_e adalah momen putar listrik (Nm)

T_a adalah momen putar percepatan (Nm)

Momen putar mekanis T_m dan momen putar listrik T_e dianggap positif untuk generator sinkron. Ini berarti bahwa T_m adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah perputaran θ_m yang positif. Untuk generator yang bekerja dalam keadaan tetap, T_m dan T_e adalah sama, sedangkan momen putar T_a sama dengan nol. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan ataupun perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Dalam penulisan ini T_m dianggap konstan pada setiap keadaan kerja yang diberikan.

Karena θ_m diukur terhadap sumbu pedoman yang diam pada stator, maka θ_m adalah ukuran absolut sudut rotor. Karena itu pula θ_m akan terus bertambah dengan waktu, bahkan juga pada kecepatan serempak yang konstan. Dengan memperhatikan kecepatan rotor relatif terhadap kecepatan serempak, maka akan lebih mudah untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak. Dari sini didefinisikan :

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \text{ radian} \quad (2-25)$$

dimana ω_{sm} adalah kecepatan serempak mesin dalam radian mekanis per detik dan δ_m adalah pergeseran sudut rotor dalam radian mekanis dari sumbu pedoman yang

berputar dengan kecepatan serempak. Dengan menurunkan persamaan terhadap waktu diperoleh:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad \text{radian/detik} \quad (2-26)$$

dan

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad \text{radian/detik}^2 \quad (2-27)$$

Persamaan (2-26) di atas menunjukkan bahwa kecepatan sudut rotor $d\theta_m/dt$ adalah konstan dan sama dengan kecepatan serempak hanya bila $d\delta_m/dt$ sama dengan nol. Karena itu $d\delta_m/dt$ adalah penyimpangan sudut rotor dari keadaan serempak dan dilihat dalam satuan radian mekanis per detik.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-27) dengan persamaan (2-24) dapat diperoleh :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{Nm} \quad (2-28)$$

dengan mengingat bahwa :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m \quad \text{radian/detik} \quad (2-29)$$

sebagai kecepatan sudut rotor. Daya adalah sama dengan hasil kali momen putar dengan kecepatan sudut, sehingga bila persamaan (2-28) dikalikan dengan ω_m diperoleh:

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{watt} \quad (2-30)$$

Dimana P_m adalah masukan daya poros ke mesin dikurangi daya rugi-rugi perputaran, P_e adalah daya listrik pada celah udaranya dan P_a adalah daya percepatan yang menjelaskan setiap ketidakseimbangan antara P_m dan P_e . Umumnya rugi-rugi perputaran dan I^2R jangkar dapat diabaikan sehingga P_m dapat dianggap sebagai daya yang dicatu oleh penggerak mula dan P_e sebagai keluaran daya listrik.

Koefisien $J\omega_m$ adalah momen sudut rotor. Pada kecepatan serempak momen ini dinyatakan dengan M dan disebut konstanta kelembaman (*inertia constant*) dari mesin itu dan dituliskan sebagai :

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad \text{watt} \quad (2-31)$$

Meski telah digunakan M dalam persamaan ini, koefisien tersebut bukanlah suatu koefisien dalam arti sebenarnya karena ω_m tidak sama dengan kecepatan serempak

pada semua keadaan kerja. Namun dalam prakteknya ω_m tidak terlalu berbeda dari kecepatan serempak bila mesinnya stabil. Karena daya lebih memudahkan perhitungan dalam perhitungan daripada momen putar, maka persamaan (2-31) lebih banyak dipilih. Dalam data mesin yang diberikan untuk studi kestabilan, satu lagi konstanta yang diperlukan yaitu konstanta H yang didefinisikan sebagai hasil bagi antara daya kinetis yang disimpan dalam megajoule pada kecepatan serempak dengan *rating* mesin dalam MVA.

$$H = \frac{0,5J\omega_{sm}^2}{S} = \frac{0,5M\omega_{sm}}{S} \text{ MJ/MVA} \quad (2-32)$$

dengan menyelesaikan persamaan (2-32) didapat

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S \text{ MJ/radian mekanis} \quad (2-33)$$

dan dengan memasukkan persamaan ini ke persamaan (2-31) didapatkan

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S} = \frac{P_m - P_e}{S} \quad (2-34)$$

persamaan di atas bila dinyatakan dalam per unit dapat dituliskan dalam bentuk

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ pu} \quad (2-35)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \text{ pu} \quad (2-36)$$

dan dari persamaan (2-34) didapat

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_s \text{ radian/detik} \quad (2-37)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \text{ radian/detik} \quad (2-38)$$

persamaan di atas merupakan persamaan ayunan generator serempak.

2.9 Hubungan Sudut-Daya

Model sederhana dari sebuah generator yang terhubung ke *infinite* bus melalui sistem transmisi seperti ditunjukkan pada Gambar 2.7. Model tersebut dapat dikurangi seperti yang ditunjukkan dengan mengganti generator dengan tegangan yang konstan di belakang reaktansi peralihan (model klasik). Telah diketahui bahwa daya maksimum dapat disalurkan ke *infinite* bus dalam jaringan seperti itu. Hubungan antara daya listrik dari generator P_e dan sudut rotor mesin adalah (Grigsby, 2007:8.3):

$$P_e = \frac{E'E_B}{X_T} \sin \delta = P_{max} \sin \delta \quad (2-39)$$

dengan P_e : daya listrik generator (W),

E' : tegangan generator (V),

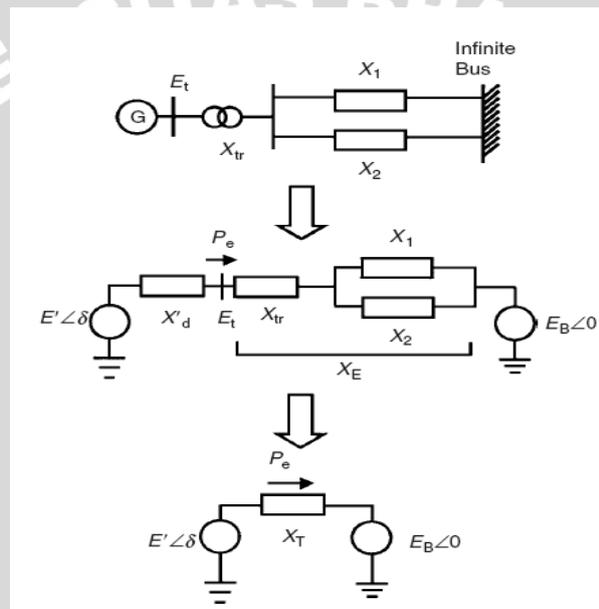
E_B : tegangan infinite bus (V),

X_T : reaktansi total (Ω), dan

δ : sudut rotor mesin

dimana untuk $\delta = 90^\circ$,

$$P_{max} = \frac{E'E_B}{X_T} \quad (2-40)$$



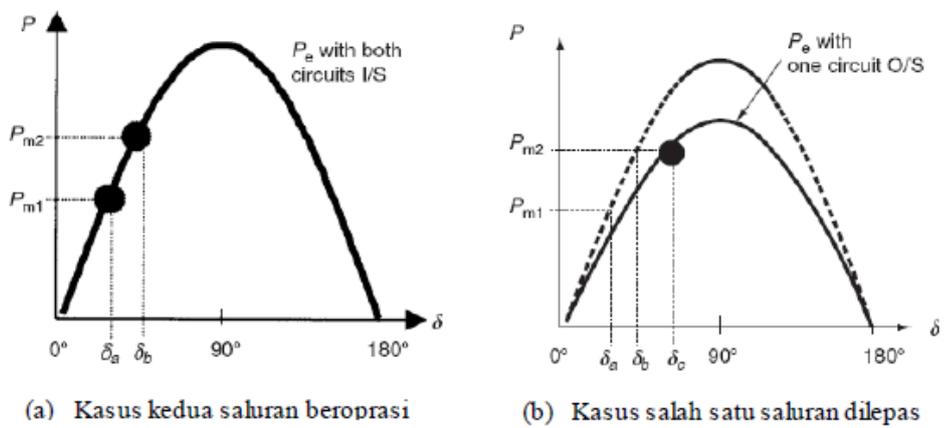
Gambar 2.7 Model sederhana dari generator yang terhubung ke infinite bus

Sumber : Grigsby, 2007:8.4

Persamaan (2-39) dapat ditunjukkan secara grafis seperti Gambar 2.8 yang dapat dilihat bahwa peningkatan daya pada nilai awal δ meningkat hingga mencapai 90° ketika P_e mencapai maksimum. Di atas $\delta = 90^\circ$, daya menurun sampai pada $\delta = 180^\circ$, $P_e = 0$. Ini adalah hubungan daya-sudut yang disebutkan di atas dan menggambarkan energi listrik ditransmisikan sebagai fungsi dari sudut rotor. Hal ini dijelaskan dari Persamaan (2-40) bahwa daya maksimum adalah fungsi dari tegangan generator dan *infinite* bus, dan yang lebih penting, fungsi dari reaktansi sistem transmisi, dengan reaktansi yang lebih besar, semakin rendah daya maksimal.

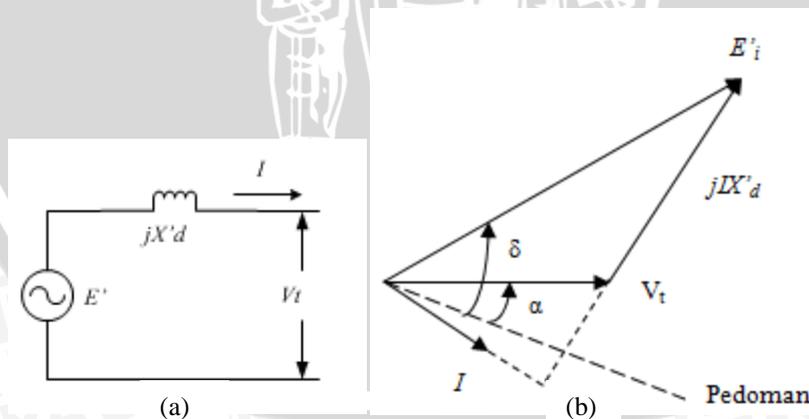
Gambar 2.8 (a) menunjukkan bahwa masukan daya yang diberikan pada generator P_{m1} , daya keluaran listrik P_e (sama dengan P_m) dan sudut rotor adalah δ_a . Daya mekanik meningkat menjadi P_{m2} , kenaikan sudut rotor menjadi δ_b . Gambar 2.8 (b)

menunjukkan kasus dengan salah satu jaringan transmisi dihapus menyebabkan peningkatan X_T dan penurunan P_{max} . Hal ini dapat dilihat bahwa untuk masukan mekanis yang sama (P_{M1}), maka situasi dengan dihilangkannya satu *line* menyebabkan peningkatan sudut rotor δ_c .



Gambar 2.8 Hubungan Sudut-daya
 Sumber : Grigsby, 2007:8.4

Untuk studi kestabilan *transient* setiap mesin serempak diwakili oleh tegangan peralihannya (*transient internal voltage*) E' yang terhubung seri dengan reaktansi peralihan X'_d seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.9 (a) dimana V_t adalah tegangan terminal. Resistansi jangkar dapat diabaikan dalam kebanyakan hal sehingga diagram fasor Gambar 2.9 (b) berlaku. Dengan δ merupakan sudut rotor yang merupakan sudut tegangan peralihannya diukur terhadap pedoman bersama sistem itu.



Gambar 2.9 (a) Rangkaian mesin serempak kondisi peralihan (b) Diagram fasor mesin serempak kondisi peralihan

Sumber : Stevenson, 1990:359

2.10 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan merupakan kemampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga tegangan tetap stabil di semua bus saat kondisi operasi normal dalam suatu sistem setelah mengalami gangguan (Kundur, 1994:27). Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan adalah ketidakmampuan dari sistem tenaga untuk menyuplai daya reaktif beban. Jika stabilitas tegangan terjaga, tegangan dan daya pada sistem akan dapat dikendalikan setiap saat. Secara umum, ketidakmampuan sistem untuk memasok kebutuhan yang diperlukan menyebabkan ketidakstabilan tegangan.

Fenomena ketidakstabilan tegangan dapat berlangsung cepat (jangka pendek) atau lambat (jangka panjang), (*IEEE-CIGRE*, 2004). Masalah stabilitas tegangan jangka pendek biasanya terkait dengan kecepatan tanggapan dari pengatur tegangan (misalnya, AVR) dan konverter daya elektronik, seperti yang ditemui dalam sistem transmisi AC fleksibel atau *FACTS* dan sistem tegangan tinggi DC (*HVDC*). Dalam kasus pengatur tegangan, ketidakstabilan tegangan biasanya terkait dengan ketidaksesuaian teraan pada sistem pengaturan. Masalah-masalah stabilitas tegangan yang berlangsung cepat telah dipelajari dengan menggunakan berbagai analisis teknik dan peralatan yang sesuai dengan model dan mensimulasikan tanggapan dinamik dari pengontrol tegangan dan konverter yang diteliti, seperti program stabilitas peralihan dan simulator peralihan elektromagnetik.

2.11 Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi merupakan suatu kemampuan sistem daya untuk menjaga frekuensi tetap stabil dalam kisaran nominal pada keadaan gangguan yang dapat mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban (Grigsby, 2007:7.8). Hal itu tergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem generator dan beban, dengan rugi-rugi minimal pada beban. Gangguan sistem yang parah umumnya mengakibatkan perubahan besar terhadap frekuensi, arus aliran daya, tegangan, dan variabel sistem lainnya, sehingga memerlukan tindakan proses, kontrol, dan proteksi yang tidak dimodelkan dalam stabilitas yang konvensional atau studi stabilitas tegangan. Umumnya, masalah stabilitas frekuensi berkaitan dengan ketidakmampuan tanggapan peralatan, koordinasi yang buruk dalam kontrol dan peralatan proteksi, atau cadangan generator pembangkit tidak mencukupi.

2.12 Persamaan Transient

Dalam kondisi *transient* atau peralihan generator diperlukan suatu tegangan peralihan yaitu E'_d dan E'_q yang mewakili gandengan fluks pada kumparan rotor. Tegangan peralihan ini dapat ditunjukkan melalui adanya reaktansi peralihan generator sinkron yaitu X'_d dan X'_q (Arrillaga, 1990:160).

$$E'_q - V_q = R_a I_q - X'_d I_d \quad (2-41)$$

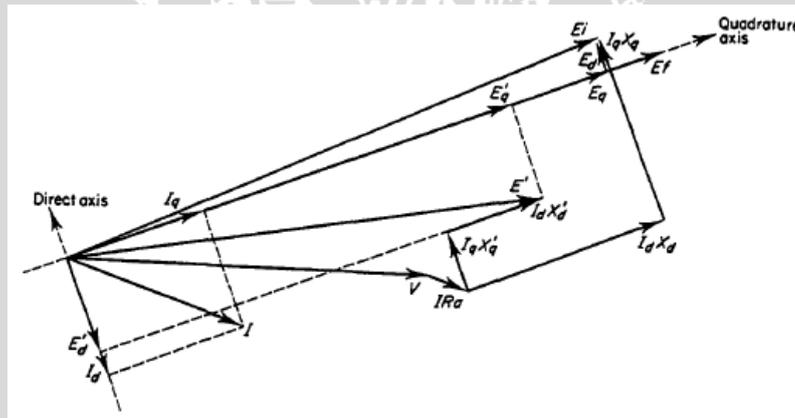
$$E'_d - V_d = R_a I_d + X'_q I_q \quad (2-42)$$

dimana :

- E'_d : tegangan peralihan sumbu *direct*
- E'_q : tegangan peralihan sumbu *quadrature*
- X'_d : reaktansi peralihan sumbu *direct*
- X'_q : reaktansi peralihan sumbu *quadrature*

Sekarang tegangan E harus dianggap sebagai jumlah dari dua tegangan E_d dan E_q yang merupakan tegangan di belakang reaktansi sinkron.

Diagram fasor untuk operasi mesin pada kondisi peralihan ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut:



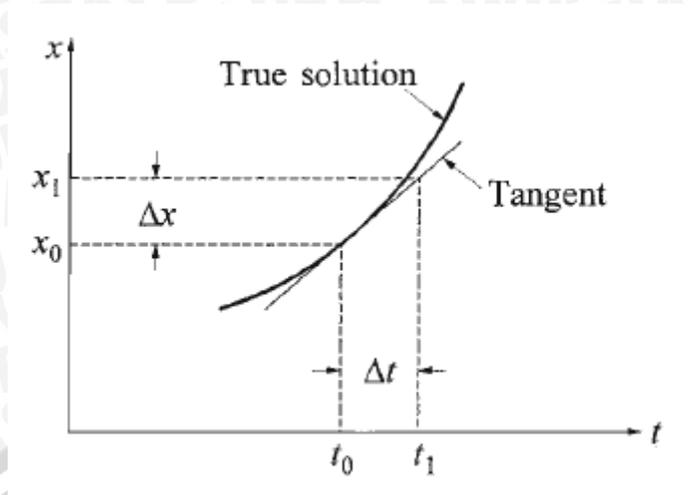
Gambar 2.10 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan peralihan
Sumber : Arrillaga, 1990:161

2.13 Metode Runge-Kutta

Pada persamaan differensial orde pertama :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t) \quad (2-43)$$

Dimana t adalah variabel bebas dan x adalah variabel tak bebas, dengan $x = x_0$ pada $t = t_0$. Gambar 2.11 menunjukkan ilustrasi penerapan prinsip penyelesaian persamaan differensial dengan metode Runge-Kutta.



Gambar 2.11 Kurva penyelesaian persamaan differensial
Sumber : Kunder, 1994:836

Merujuk pada persamaan differensial orde satu di atas, rumus Runge-Kutta orde dua untuk nilai x pada $t = t_0 + \Delta t$ adalah (Kunder, 1994:839),

$$x_1 = x_0 + \Delta x = x_0 + \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (2-44)$$

dimana

$$k_1 = f(x_0, t_0) \Delta t$$

$$k_2 = f(x_0 + k_1, t_0 + \Delta t) \Delta t$$

Secara umum bentuk persamaan tersebut dituliskan untuk nilai x pada tahap perhitungan $n + 1$ adalah (Kunder, 1994:839)

$$x_{n+1} = x_n + \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (2-45)$$

dimana

$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t$$

$$k_2 = f(x_n + k_1, t_n + \Delta t) \Delta t$$

Pada Metode Runge-Kutta orde empat, nilai x pada tahap perhitungan ke $n + 1$ adalah (Kunder, 1994:839)

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2-46)$$

dimana

$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t$$

Metode Runge-Kutta orde empat untuk penyelesaian secara simultan dari suatu persamaan differensial dalam bentuk:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y, t)$$

$$\frac{dy}{dt} = f(x, y, t)$$

dengan

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2-47)$$

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6}(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad (2-48)$$

dimana

$$k_1 = f(x_n, y_n, t_n) \Delta t$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, y_n + \frac{l_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, y_n + \frac{l_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, y_n + l_3, t_n + \Delta t) \Delta t$$

$$l_1 = f(x_n, y_n, t_n) \Delta t$$

$$l_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, y_n + \frac{l_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$

$$l_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, y_n + \frac{l_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$

$$l_4 = f(x_n + k_3, y_n + l_3, t_n + \Delta t) \Delta t$$

Metode Runge-Kutta orde empat seperti yang telah diuraikan akan digunakan untuk menyelesaikan persamaan ayunan.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{2H} (P_m - P_e)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

dengan melakukan penyesuaian terhadap metode Runge-Kutta, maka persamaan ayunan dapat ditulis sebagai :

$$\delta i_{(t+\Delta t)} = \delta i_t + \frac{1}{6} (k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}) \quad (2-49)$$

$$\omega i_{(t+\Delta t)} = \omega i_t + \frac{1}{6} (l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}) \quad (2-50)$$

dengan $i = 1, 2, 3, \dots, n$ dimana nilai $\Delta\delta$ dan $\Delta\omega$ adalah

$$\Delta\delta i_{(t+\Delta t)} = \frac{1}{6} (k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}) \quad (2-51)$$

$$\Delta\omega i_{(t+\Delta t)} = \frac{1}{6} (l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}) \quad (2-52)$$

Nilai k dan l dapat dicari melalui beberapa perkiraan,

Perkiraan pertama:

$$k_{1i} = (\omega_{1i} - \omega_s) \Delta t \quad (2-53)$$

$$l_{1i} = \frac{\omega}{2H} (P_{mi} - P_{ei}^{(1)}(t)) \Delta t \quad (2-54)$$

dengan $i = 1, 2, 3, \dots, n$ dan

$P_{ei}^{(1)}$ adalah daya keluaran generator saat sudut daya $\delta_0(t = 0)$

Perkiraan kedua:

$$k_{2i} = \left\{ \left(\omega_{(t)} + \frac{l_{1i}}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t \quad (2-55)$$

$$l_{2i} = \frac{\omega}{2H} (P_{mi} - P_{ei}^{(2)}(t)) \Delta t \quad (2-56)$$

dengan $i = 1, 2, 3, \dots, n$ dan

$P_{ei}^{(2)}$ adalah daya keluaran generator saat sudut daya $(\delta_{i(t)} + k_{1i}/2)$

Perkiraan ketiga:

$$k_{3i} = \left\{ \left(\omega_{(t)} + \frac{l_{2i}}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t \quad (2-57)$$

$$l_{3i} = \frac{\omega}{2H} (P_{mi} - P_{ei}^{(3)}(t)) \Delta t \quad (2-58)$$

dengan $i = 1, 2, 3, \dots, n$ dan

$P_{ei}^{(3)}$ adalah daya keluaran generator saat sudut daya $(\delta_{i(t)} + k_{2i}/2)$

Perkiraan keempat:

$$k_{4i} = \left\{ \left(\omega_{(t)} + \frac{l_{3i}}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t \quad (2-59)$$

$$l_{4i} = \frac{\omega}{2H} (P_{mi} - P_{ei}^{(4)}(t)) \Delta t \quad (2-60)$$

dengan $i = 1, 2, 3, \dots, n$ dan

$P_{ei}^{(4)}$ adalah daya keluaran generator saat sudut daya $(\delta_{i(t)} + k_{3i}/2)$, sehingga diperoleh nilai sudut daya dan kecepatan sudut:

$$\delta i_{(t+\Delta t)} = \delta i_t + \frac{1}{6} (k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}) \quad (2-61)$$

$$\omega i_{(t+\Delta t)} = \omega i_t + \frac{1}{6} (l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}) \quad (2-62)$$

2.14 Generator Sinkron

Generator sinkron diklasifikasikan sebagai generator berkecepatan tinggi dan digerakkan oleh uap atau turbin gas, atau generator berkecepatan rendah yang digerakkan oleh turbin air. Biasanya generator berkecepatan tinggi terdiri dari dua atau empat kutub sehingga di sistem 50 Hz generator akan digerakkan pada kecepatan 3000 atau 1500 rpm. Sebaliknya, generator kecepatan rendah biasanya beroperasi pada 500 rpm dan di bawahnya, memiliki jumlah kutub yang cukup besar (Jan Machowski, 2008:10).

Kedua bagian utama sebuah mesin serempak adalah susunan ferromagnetik. Bagian yang diam, yang pada dasarnya adalah sebuah silinder kosong dinamakan stator atau jangkar (*armature*) dan mempunyai parit-parit (*slots*) yang didalamnya terdapat lilitan kumparan stator. Lilitan ini membawa arus yang diberikan pada suatu beban listrik atau sistem oleh sebuah generator. Rotor adalah bagian dari mesin yang dipasang pada poros dan berputar di dalam stator yang kosong. Lilitan pada rotor dinamakan lilitan medan (*field winding*) dan dicatu dengan arus DC (Stevenson, 1990:122).

Belitan eksitasi diberikan arus DC untuk menghasilkan fluks magnetik dengan daya yang sebanding dengan arus eksitasi. Fluks magnet berputar kemudian menginduksi pada setiap kumparan fasa stator yang menghasilkan gaya gerak listrik (ggl) pada kumparan tiga fasa yang mengakibatkan arus AC mengalir menuju ke sistem daya yang dalam keadaan berbeban. (Jan Machowski, 2008:10).

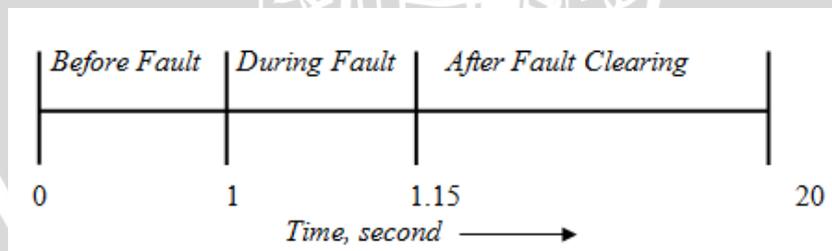
2.15 Komputer Digital untuk Studi Kestabilan

Program komputer digital masa kini untuk studi kestabilan peralihan telah berkembang dari dua kebutuhan dasar, yaitu (a) keperluan untuk mempelajari sistem yang sangat besar yang saling berhubungan dengan jumlah mesin yang sangat banyak dan (b) kebutuhan untuk melukiskan mesin dan sistem pengaturannya berkaitan dengan model yang lebih terperinci. Representasi mesin secara klasik memang sesuai untuk

banyak studi. Tetapi, model yang lebih lengkap dan terperinci mungkin diperlukan untuk mewakili alternator turbo modern dengan karakteristik dinamis yang ditentukan oleh berbagai kemajuan teknologi dalam rancangan mesin dan sistem pengaturannya (Stevenson, 1990:387).

Model mesin sinkron yang paling sederhana ialah model yang digunakan dalam studi-studi stabilitas klasik. Model mesin 2 sumbu yang lebih memberikan kondisi fluks sumbu *direct* dan sumbu *quadrature* selama periode sub-peralihan dan peralihan yang mengikuti gangguan sistem. Misalnya, bila model mesin tidak dengan khusus dan jelas memberikan gandengan fluks yang berubah-ubah dari kumparan medan pada sumbu *direct*, adalah tidak mungkin untuk merepresentasikan bekerjanya regulator tegangan dan sistem penguatan yang bekerja secara kontinu dan otomatis dan melengkapi semua mesin modern. Sistem pengaturan turbin, yang secara otomatis mengatur masukan daya mekanis ke unit pembangkit, juga memiliki karakteristik tanggapan dinamis yang dapat mempengaruhi dinamika rotor. Bila susunan pengaturan ini harus direpresentasikan juga, model unit pembangkit harus diperluas lebih lanjut. Model generator yang lebih rumit menimbulkan persamaan differensial dan aljabar yang lebih banyak jumlahnya untuk setiap mesin. Dalam studi sistem yang besar, banyak generator yang saling dihubungkan dengan pusat beban yang tersebar luas oleh sistem transmisi yang luas pula, yang perilakunya juga harus dinyatakan oleh sejumlah besar persamaan aljabar.

Dalam melakukan analisis terhadap stabilitas terdapat suatu tipe waktu simulasi yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Estimasi waktu gangguan pada analisis stabilitas
Sumber : Natarajan, 2002:5.6

2.16 Faktor yang Mempengaruhi Stabilitas Peralihan

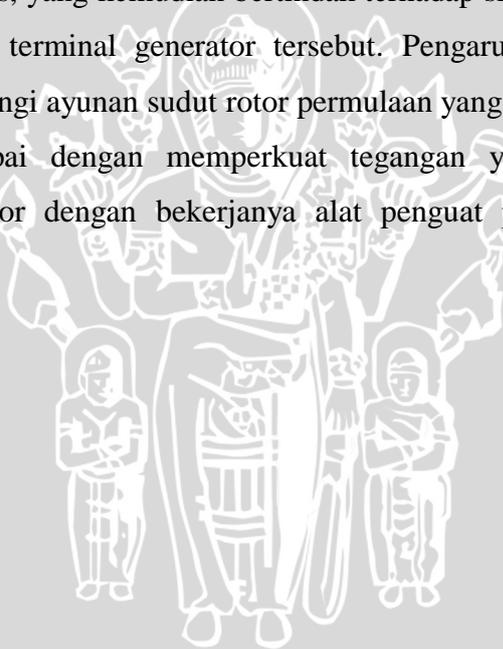
Ada 2 faktor yang dapat berfungsi sebagai kriteria penunjuk bagi stabilitas relatif suatu unit pembangkit dalam sistem daya. Faktor tersebut adalah ayunan sudut mesin selama dan setelah terjadinya gangguan dan waktu pemutusan kritis. Dalam hal

ini jelas bahwa konstanta H dan reaktansi peralihan X'_d dari unit pembangkit memiliki pengaruh langsung pada kedua kriteria di atas.

Teknik pengaturan stabilitas dan rancangan sistem transmisi telah mengalami perkembangan sedemikian rupa sehingga meningkatkan stabilitas sistem secara keseluruhan. Rancangan-rancangan pengaturan ini meliputi (Grainger & Stevenson, 1994:744):

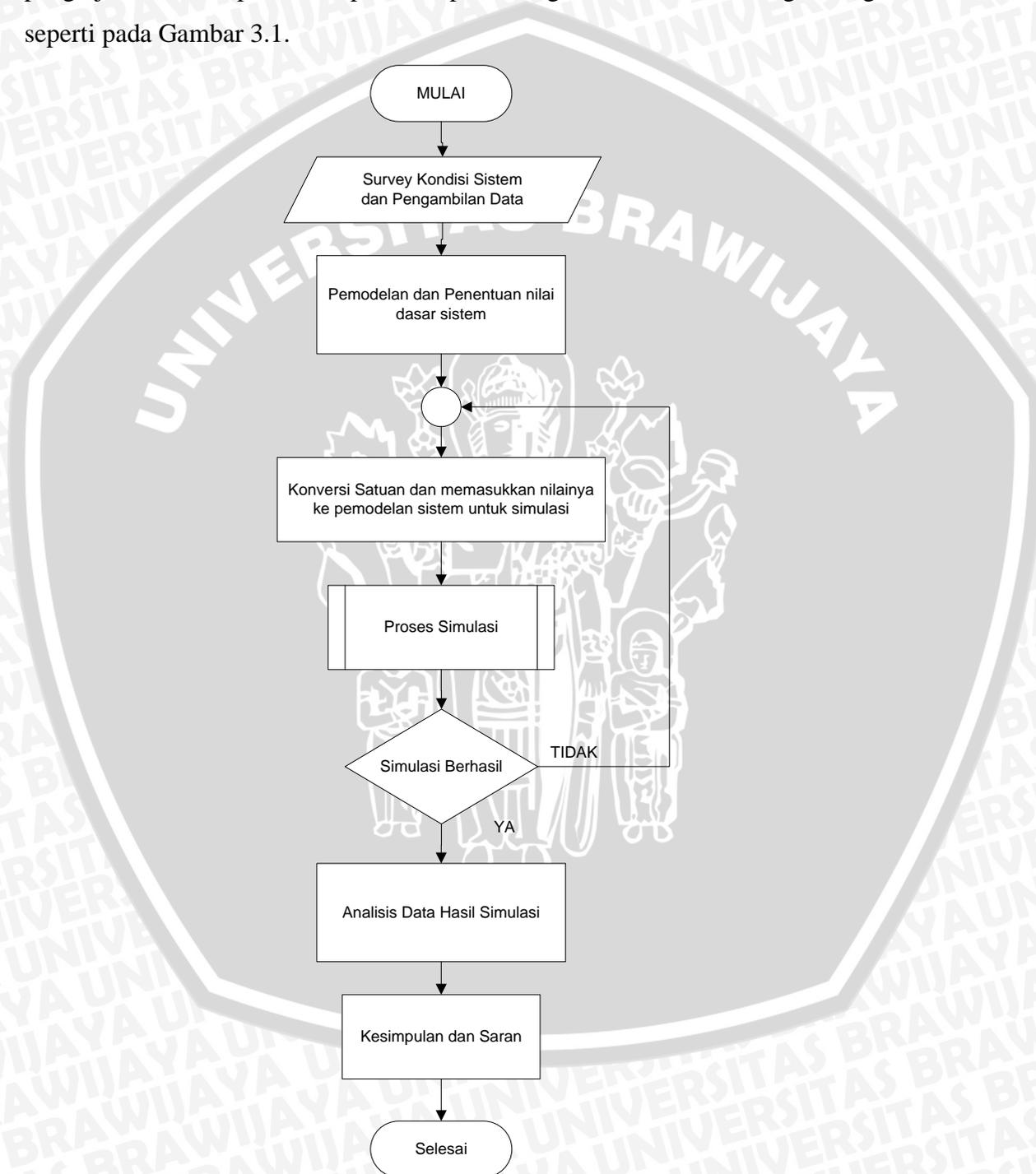
- Sistem eksitasi
- Pengaturan katup turbin
- Operasi kutub-tunggal dari pemutus-pemutus rangkaian
- Waktu pemutusan gangguan yang lebih tepat

Bila pada suatu sistem timbul gangguan, maka tegangan di semua bus akan berkurang. Pada terminal generator, tegangan yang berkurang ini dirasakan oleh pengatur tegangan otomatis, yang kemudian bertindak terhadap sistem penguatan untuk mengembalikan tegangan terminal generator tersebut. Pengaruh umum dari sistem penguatan adalah mengurangi ayunan sudut rotor permulaan yang terjadi setelah adanya gangguan. Hal ini dicapai dengan memperkuat tegangan yang dikenakan pada kumparan medan generator dengan bekerjanya alat penguat pada jalur maju dari tegangan.



BAB III METODE PENELITIAN

Pada bagian ini akan memberikan gambaran urutan langkah-langkah yang dilaksanakan untuk mencapai tujuan penyusunan penelitian. Langkah-langkah pengerjaan metode penelitian pada skripsi ini digambarkan sesuai dengan diagram alir seperti pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Secara Keseluruhan
Sumber : Penulis

Adapun urutan langkah-langkah penyusunan penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.1 Survei Kondisi Sistem dan Pengambilan Data

Pengambilan data untuk penelitian ini dilakukan di PT. Kebon Agung Malang. Sebelum pengambilan data, telah dilakukan survei terlebih dahulu dengan cara berkunjung ke sana dan berdiskusi tentang sistem kelistrikan yang ada di PT. Kebon Agung Malang. Data yang diambil antara lain adalah data primer dan data sekunder.

a. Data Primer

Data primer merupakan data yang didapat dari hasil pengamatan dan survei lapangan. Data primer yang diperoleh meliputi data parameter-parameter sistem daya meliputi diagram segaris sistem (generator, transformator, saluran dan beban) yang terdapat di PT. Kebon Agung Malang.

b. Data Sekunder

Data sekunder yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, dan internet. Data sekunder yang diperlukan antara lain data dinamik generator.

3.2 Pemodelan

Pemodelan sistem daya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *PSSE* (*Power System Simulator for Engineering*) yang berfungsi untuk memodelkan kondisi sistem daya yang ada dan menyimulasikan.

3.3 Perhitungan dan Simulasi

3.3.1 Perhitungan

Data-data yang telah terkumpul selanjutnya diolah melalui perhitungan sehingga diperoleh data stabilitas transien pada sistem tenaga listrik di PT. Kebon Agung Malang sesuai dengan rumusan masalah, meliputi stabilitas tegangan dan sudut rotor di PT. Kebon Agung Malang saat terjadi gangguan hubung singkat sebelum dan sesudah penambahan kapasitas generator. Maka secara terperinci proses perhitungan dilakukan sesuai urutan dibawah ini :

1. Menentukan jumlah bus yang akan digunakan
2. Menetapkan bus generator 1 sebagai *slack* bus, bus generator 2 sebagai bus generator sedangkan bus beban merupakan bus yang tidak difungsikan sebagai bus generator maupun *slack* bus.
3. Menetapkan daya dan tegangan dasar sebagai dasar perhitungan per unit.

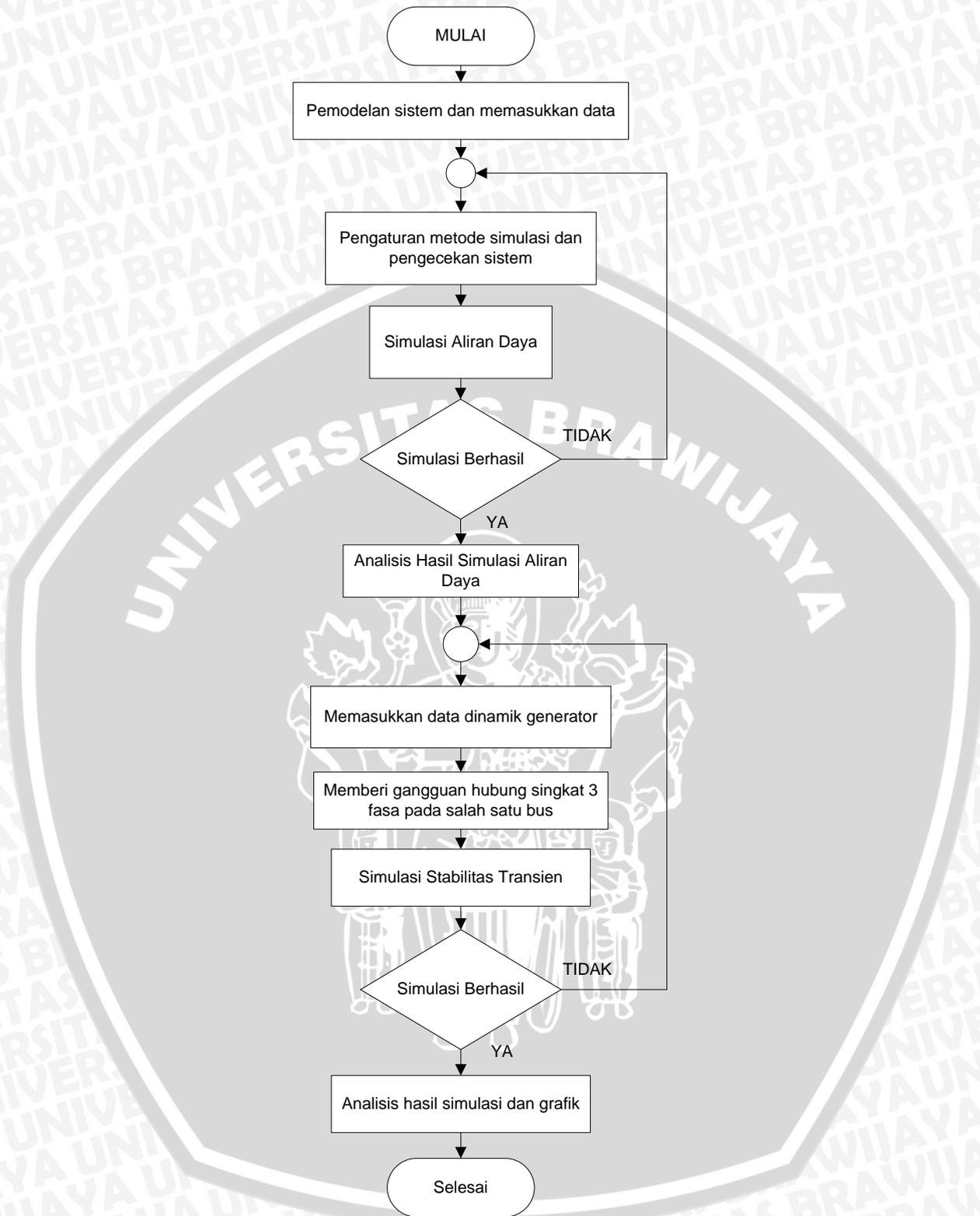
4. Menghitung nilai impedansi dasar (Z_{base}) pada PT. Kebon Agung Malang serta mengubah impedansi sistem menjadi satuan per unit.
5. Menghitung besar impedansi tiap saluran sesuai dengan *datasheet*. Sehingga impedansi dapat dihitung dengan rumus:

$$Z \text{ (impedansi)} = \text{ohm/km} \times \text{panjang saluran}$$
6. Menkonversi nilai impedansi (Z) saluran antar bus dalam bentuk rectangular ($R + jX$) dari satuan ohm (Ω) menjadi per unit dengan cara membagi nilai impedansi saluran dengan nilai impedansi dasar (Z_{base}).
7. Menghitung besar daya total beban pada masing-masing bus untuk menentukan bus yang akan diberikan gangguan untuk menganalisis stabilitas transien di PT. Kebon Agung Malang.
8. Membuat model sistem saat sebelum penambahan kapasitas generator atau generator 1 dan generator 2 aktif dilakukan pada perangkat lunak PSSE.
9. Memasukkan data-data yang telah didapat ke perangkat lunak PSSE.
10. Melakukan simulasi aliran daya dengan mengacu pada metode Newton-Raphson.
11. Memberikan gangguan hubung singkat pada salah satu bus selama 0,15 detik
12. Melakukan analisis stabilitas transien setelah terjadi gangguan pada bus.
13. Menetapkan bus generator 1 sebagai *slack* bus, bus generator 3 sebagai bus generator sedangkan bus beban merupakan bus yang tidak difungsikan sebagai bus generator maupun *slack* bus.
14. Membuat model sistem setelah penambahan kapasitas generator atau generator 1 dan generator 3 aktif dilakukan pada perangkat lunak PSSE.

Melakukan langkah nomer 9 sampai nomer 12 serta menganalisis stabilitas transien baik sebelum dan setelah penambahan kapasitas generator.

3.3.2 Simulasi

Dalam pembuatan Tugas Akhir ini menggunakan *software* bantu untuk mempermudah membuat pemodelan dan simulasi. Langkah-langkah pengerjaan simulasi digambarkan sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3.2 Diagram Alir Simulasi
 Sumber : Penulis

Software yang digunakan adalah PSS@E (*Power Sistem Simulator for Engineering*), langkah-langkah pembuatannya adalah sebagai berikut:

1. Membuat file baru pada perangkat lunak dan menentukan nilai dasar sebesar 2 MVA.
2. Memodelkan desain awal sistem daya saat generator 1 dan generator 2 aktif.
3. Memasukkan nilai tiap komponen sesuai data primer seperti data beban, data saluran dan data transformator.
4. Melakukan pengecekan *error* sistem.
5. Melakukan simulasi aliran daya pada model awal sistem daya dengan metode Full Newton-Raphson.
6. Mencatat data aliran daya sebagai bahan evaluasi studi stabilitas.
7. Mengkonversi data generator dan beban kedalam bentuk dinamik.
8. Memasukkan data dinamik generator.
9. Memberikan gangguan pada salah satu bus selama 0,15 detik.
10. Melakukan simulasi stabilitas transien meliputi sudut rotor, tegangan dan frekuensi.
11. Melakukan analisis terhadap hasil simulasi.
12. Menggambar dan memodelkan desain sistem daya saat generator 1 dan generator 3 aktif.
13. Melakukan langkah 4 sampai 10.
14. Melakukan analisis terhadap hasil simulasi.

3.4 Kesimpulan dan Saran

Pada tahapan ini dilakukan pengambilan kesimpulan berdasarkan teori, hasil perhitungan serta analisis. Selain kesimpulan, akan dicantumkan saran-saran kepada perusahaan dan pembaca yang akan melakukan studi terkait dengan skripsi ini. Meliputi hal-hal yang menjadi kendala dalam penelitian ataupun hal-hal yang masih memerlukan kajian lebih dalam lagi.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dibahas beberapa hal mengenai stabilitas transien sistem tenaga listrik di PT. Kebon Agung Malang. Permasalahan yang akan dibahas adalah stabilitas sistem tenaga listrik pada kondisi sebelum penambahan kapasitas generator dan kondisi setelah penambahan kapasitas generator yang meliputi stabilitas sudut rotor, stabilitas tegangan dan frekuensi terhadap gangguan 3 fasa yang terjadi pada salah satu bus. Pada analisisnya, akan disajikan grafik sudut rotor, tegangan dan frekuensi sebagai fungsi waktu.

4.1 Kondisi Kelistrikan di PT. Kebon Agung Malang

4.1.1 Sistem Pembangkitan

Sistem Kelistrikan PT. Kebon Agung Malang disuplai oleh sumber listrik yang berasal dari 2 buah Generator. Generator tersebut menyuplai beban untuk Stasiun Listrik, Stasiun Ketel, Stasiun Gilingan, Stasiun Tengah dan sebagian Stasiun Puteran. Total bus beban yang disuplai oleh 2 buah Generator adalah 30 bus beban.

Generator terdiri dari Generator 1 dengan kapasitas 5,625 MVA memiliki rating tegangan 6 kV dan Generator 2 dengan kapasitas 2,135 MVA memiliki rating tegangan 0,4 kV. Dua buah Generator tersebut bekerja secara paralel untuk menyuplai beban listrik di PT. Kebon Agung Malang. Data generator dan transformator dapat dilihat pada lampiran 2.

4.1.2 Sistem Distribusi Daya

PT. Kebon Agung Malang memiliki 2 buah generator dan 2 buah transformator untuk menyuplai kebutuhan listrik sejumlah beban di industri tersebut. Generator 1 terhubung dengan 2 buah transformator pada sisi 6 kV dengan rating daya transformator sebesar masing-masing 3,15 MVA, kemudian diturunkan menjadi 0,4 kV sesuai dengan kebutuhan industri dan dihubungkan ke bus utama. Sedangkan Generator 2 terhubung dengan bus utama dengan rating tegangan sebesar 0,4 kV. Bus utama tersebut tersambung dengan bus beban melalui saluran kabel yang panjangnya bervariasi sesuai dengan lampiran 4.

Jumlah bus beban dan saluran yang tersambung dengan bus utama adalah 30 bus. Bus beban tersebut tersebar pada 5 stasiun pengolahan tebu, yaitu stasiun listrik,

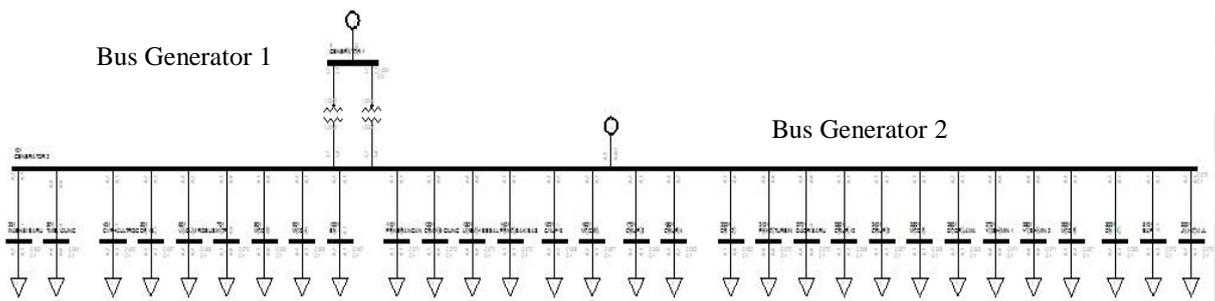
stasiun ketel, stasiun gilingan, stasiun tengah dan stasiun puteran. Sistem daya listrik dari PT. Kebon Agung Malang dapat dilihat pada diagram segaris pada lampiran 1.

4.2 Pemodelan Sistem dan Pengolahan Data

4.2.1 Pemodelan Sistem

1. Sistem daya PT. Kebon Agung sebelum penambahan kapasitas generator

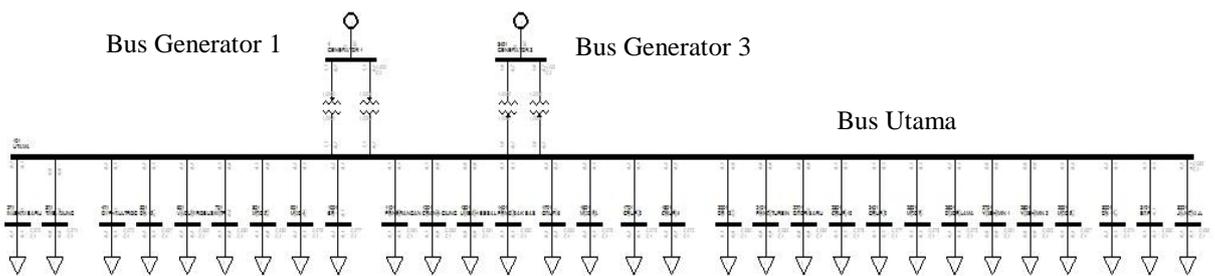
Berdasarkan data dalam lampiran, diagram segaris sistem daya akan dimodelkan sesuai dengan keperluan analisis dan simulasi stabilitas transien pada PT. Kebon Agung Malang. Dalam operasi ini terdapat 2 buah generator dan 2 buah transformator yang bekerja. Bus beban pada operasi ini berjumlah 30 bus. Pemodelan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Pemodelan PT. Kebon Agung sebelum penambahan kapasitas generator
Sumber : Hasil Pemodelan

2. Sistem daya PT. Kebon Agung setelah penambahan kapasitas generator

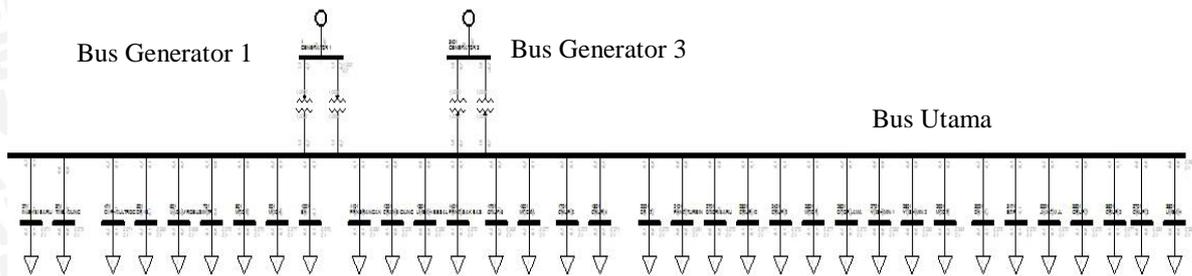
Berdasarkan data dalam lampiran, diagram segaris sistem daya akan dimodelkan sesuai dengan keperluan analisis dan simulasi stabilitas transien pada PT. Kebon Agung Malang. Dalam operasi ini terdapat 2 buah generator dan 4 buah transformator yang bekerja. Bus beban pada operasi ini berjumlah 30 bus. Pemodelan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.2 berikut.



Gambar 4.2 Pemodelan PT. Kebon Agung setelah penambahan kapasitas generator
Sumber : Hasil Pemodelan

3. Sistem daya PT. Kebon Agung setelah penambahan kapasitas generator dan penambahan beban

Dalam operasi ini terdapat 2 buah generator dan 4 buah transformator yang bekerja. Bus beban pada operasi ini berjumlah 34 bus. Pada operasi ini penambahan beban dilakukan dengan menambah bus beban Grup 1, Grup 2, Grup 3 dan Limbah Base In yang dihubungkan dengan bus Utama. Pemodelan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Pemodelan PT. Kebon Agung setelah penambahan kapasitas generator dan penambahan beban

Sumber : Hasil Pemodelan

4.2.2 Data Generator

Dalam melakukan perhitungan mengenai parameter – parameter sistem daya dalam satuan p.u. akan digunakan teraan nilai dasar 2 MVA sebagai daya dasar dan tegangan 0,4 kV sebagai tegangan dasar. Data–data yang diperlukan dalam melakukan analisis stabilitas meliputi daya, tegangan, frekuensi dan data dinamik generator.

Nilai reaktansi generator dalam satuan p.u. dapat diperoleh dengan suatu konversi satuan sesuai dengan Persamaan (4-1) berikut (Grainger & Stevenson, 1994:29).

$$X_{p.u. (baru)} = X_{p.u. (lama)} \left[\frac{KV_{lama} \text{ dasar}}{KV_{baru} \text{ dasar}} \right]^2 \cdot \left[\frac{MVA_{baru} \text{ dasar}}{MVA_{lama} \text{ dasar}} \right] \quad (4-1)$$

Dengan menggunakan persamaan di atas, nilai reaktansi baru dari data dua jenis generator dapat diperoleh. Data generator setelah proses konversi satuan ditunjukkan dalam Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Data parameter dinamik generator

No.	Parameter	Generator 1 & 3	Generator 2	Satuan
1.	S	5,625	2,135	p.u.
2.	Xd	1,9	0,72	p.u.
3.	X'd	0,28	0,1062	p.u.
4.	X''d	0,1800	0,0436	p.u.

5.	Xq	1,8	0,683	p.u.
6.	X'q	0,4100	0,155	p.u.
7.	X''q	0,115	0,0436	p.u.
8.	Xl	0,0800	0,0800	p.u.
9.	Td'o	4,8	4,8	s
10.	Td''o	0,035	0,035	s
11.	Tq'o	0,45	0,45	s
12.	Tq''o	0,06	0,06	s
13.	H	6	6	MJ/MVA
14.	D	0	0	-

Sumber : Hasil perhitungan

4.2.3 Data Saluran

Saluran transmisi PT. Kebon Agung Malang memiliki data-data yang ditunjukkan pada Tabel 4.2 dengan daya dasar 2 MVA dan tegangan 0,4 kV sebagai tegangan dasar:

Tabel 4.2 Data Saluran

Dari Bus	Ke Bus	R (p.u.)	X (p.u.)
Generator 2 / Utama	INJEKSI BR	0,05655	0,06123
	TIMB. GIL	0,817875	0,1222245
	CVP CULTROG	0,05655	0,06123
	DB 13	0,084825	0,091845
	VACUM ROBUSHI	0,05655	0,06123
	WTP	0,0329875	0,0357175
	BB 1	0,028275	0,030615
	MCC5	0,0424125	0,0459225
	MCC 4	0,028275	0,030615
	PENERANGAN	0,0095625	0,005553875
	CRANE GIL.	0,0377	0,04082
	BESALI	0,1085625	0,051397875
	BAK BASIN	0,0329875	0,010358075
	GRUP 6	0,05655	0,06123
	MCC 6A	0,03063125	0,03316625
	GRUP 5	0,050266667	0,054426667
	GRUP 4	0,03534375	0,03826875
	DB 12	0,0424125	0,0459225
	PEND. TURBIN	0,0120625	0,005710875
	DOOR BR	0,0706875	0,0765375
GRUP 10	0,0424125	0,0459225	
GRUP 9	0,0424125	0,0459225	
MCC 9	0,0424125	0,0459225	
DOOR LAMA	0,0706875	0,0765375	

Dari Bus	Ke Bus	R (p.u.)	X (p.u.)
Generator 2 / Utama	YOSH 1	0,020420833	0,022110833
	YOSH 2	0,016277083	0,021600583
	MCC 8	0,0424125	0,0459225
	DB 11	0,05655	0,06123
	ESP	0,026839583	0,022876208
	JIANGXI JL	0,012207813	0,016200438
	GRUP 1	0,0424125	0,0459225
	GRUP 2	0,0424125	0,0459225
	GRUP 3	0,0424125	0,0459225
	LIMBAH	0,024125	0,01142175

Sumber : Hasil perhitungan

4.2.4 Data Beban

Nilai pembebanan di PT. Kebon Agung Malang akan dicari nilai P (daya nyata) dan Q (daya kompleks), dengan nilai I (arus) telah diketahui pada saat pengambilan data dengan menggunakan $\cos \theta$ sebesar 0,8 dan tegangan 0,4 kV, sehingga diperoleh nilai P dan Q yang ditunjukkan pada Tabel 4.3 untuk kondisi sebelum dan setelah penambahan kapasitas generator. Sedangkan data pembebanan untuk kondisi setelah penambahan empat bus beban ditunjukkan pada Tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.3 Data Beban

No.	Nama Bus	P beban (MW)	Q beban (MVar)
1	INJEKSI BR	0,204	0,1264
2	TIMB. GIL	0,017	0,0105
3	CVP CULTROG	0,204	0,1264
4	DB 13	0,204	0,1264
5	VACUM ROBUSI	0,2754	0,1707
6	WTP	0,068	0,0421
7	BB 1	0,068	0,0421
8	MCC5	0,17	0,1054
9	MCC 4	0,204	0,1264
10	PENERANGAN	0,1368	0,0663
11	CRANE GIL.	0,051	0,0316
12	BESALI	0,017	0,0105
13	BAK BASIN	0,1054	0,0653
14	GRUP 6	0,2754	0,1707
15	MCC 6A	0,17	0,1054
16	GRUP 5	0,204	0,1264
17	GRUP 4	0,323	0,2002
18	DB 12	0,068	0,0421
19	PEND. TURBIN	0,017	0,0105

No.	Nama Bus	P beban (MW)	Q beban (MVar)
20	DOOR BR	0,0374	0,0232
21	GRUP 10	0,102	0,0632
22	GRUP 9	0,1394	0,0864
23	MCC 9	0,102	0,0632
24	DOOR LAMA	0,1802	0,1117
25	YOSH 1	0,0374	0,0232
26	YOSH 2	0,034	0,0211
27	MCC 8	0,408	0,2529
28	DB 11	0,17	0,1054
29	ESP	0,0986	0,0611
30	JIANGXI JL	0,153	0,0948

Sumber : Hasil perhitungan

Tabel 4.4 Data beban tambahan

No.	Nama Bus	P beban (MW)	Q beban (MVar)
1	GRUP 1	0,068	0,0421
2	GRUP 2	0,1054	0,0653
3	GRUP 3	0,034	0,0211
4	LIMBAH	0,034	0,0211

Sumber : Hasil perhitungan

4.3 Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis stabilitas transien sistem tenaga listrik. Proses simulasi aliran daya ini berdasarkan atas diagram segaris sistem dan data-data yang telah dibahas sebelumnya meliputi data pembangkit, data saluran dan data beban. Simulasi akan dilakukan dalam tiga keadaan, yaitu keadaan sebelum penambahan kapasitas generator pembangkit, keadaan setelah penambahan kapasitas generator pembangkit dan keadaan setelah penambahan kapasitas generator pembangkit dan beban. Sehingga terdapat tiga kondisi sistem yang akan dianalisis pada penelitian ini, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut:

Tabel 4.5 Kondisi Sistem

Nama	Kondisi Sistem
Kondisi 1	Sebelum penambahan kapasitas generator
Kondisi 2	Setelah penambahan kapasitas generator
Kondisi 3	Setelah penambahan kapasitas generator dan beban

4.3.1 Simulasi Aliran Daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 1

Pada simulasi aliran daya PT. Kebon Agung Malang kondisi 1 ini ditentukan bahwa bus Generator 1 adalah *slack bus* dengan tegangan $1 \angle 0^\circ$ p.u. sedangkan bus Generator 2 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi (lihat tabel). Sedangkan untuk bus yang lain ditentukan sebagai *PQ bus*. Untuk bus beban dan data saluran dapat dilihat pada pembahasan sebelumnya. Dari hasil simulasi aliran daya di Kondisi 1 diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.6 berikut:

Tabel 4.6 Data aliran daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 1

No.	Nama Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut ($^\circ$)	P gen (MW)	Q gen (MVar)	P beban (MW)	Q beban (MVar)
1	GENERATOR 1	1	0	3,3845	2,2189	0	0
2	GENERATOR 2	0,9718	-2,24	0,9	0,55	0	0
3	INJEKSI BARU	0,9618	-2,41	0	0	0,204	0,1264
4	TIMB. GILING	0,9639	-2,04	0	0	0,017	0,0105
5	CVP+CULTROG	0,9618	-2,41	0	0	0,204	0,1264
6	DB 13	0,9567	-2,49	0	0	0,204	0,1264
7	VACUM ROBUSI	0,9582	-2,46	0	0	0,2754	0,1707
8	WTP	0,9699	-2,27	0	0	0,068	0,0421
9	MCC 5	0,9693	-2,28	0	0	0,068	0,0421
10	MCC 4	0,9677	-2,31	0	0	0,17	0,1054
11	BB 1	0,9668	-2,32	0	0	0,204	0,1264
12	PENERANGAN	0,971	-2,25	0	0	0,1368	0,0663
13	CRANE GILING	0,9702	-2,27	0	0	0,051	0,0316
14	LIMBAH BESAL	0,9706	-2,23	0	0	0,017	0,0105
15	PEND BAK BAS	0,9697	-2,21	0	0	0,1054	0,0653
16	GRUP 6	0,9582	-2,46	0	0	0,2754	0,1707
17	MCC 6A	0,9673	-2,32	0	0	0,17	0,1054
18	GRUP 5	0,9629	-2,39	0	0	0,204	0,1264
19	GRUP 4	0,9619	-2,4	0	0	0,323	0,2002
20	DB 12	0,9693	-2,28	0	0	0,068	0,0421
21	PEND TURBIN	0,9717	-2,24	0	0	0,017	0,0105
22	DOOR BARU	0,9695	-2,28	0	0	0,0374	0,0232
23	GRUP 10	0,9681	-2,3	0	0	0,102	0,0632
24	GRUP 9	0,9667	-2,33	0	0	0,1394	0,0864
25	MCC 9	0,9681	-2,3	0	0	0,102	0,0632
26	DOOR LAMA	0,963	-2,39	0	0	0,1802	0,1117
27	YOSHIMIN 1	0,9712	-2,25	0	0	0,0374	0,0232
28	YOSHIMIN 2	0,9713	-2,25	0	0	0,034	0,0211
29	MCC 8	0,9567	-2,49	0	0	0,408	0,2529
30	DB 11	0,9635	-2,38	0	0	0,17	0,1054
31	ESP	0,9697	-2,26	0	0	0,0986	0,0611
32	JIANGXI JL	0,9701	-2,28	0	0	0,153	0,0948

Sumber : Hasil simulasi

Berdasarkan data hasil simulasi aliran daya tersebut diperoleh data sebagai berikut:

Total Pembangkitan	: P = 4,2845 MW
	Q = 2,7689 MVar
Total Beban	: P = 4,244 MW
	Q = 2,6116 MVar
Total Rugi-rugi	: P = 0,0405 MW
	Q = 0,1573 MVar

4.3.2 Simulasi Aliran Daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 2

Pada simulasi aliran daya PT. Kebon Agung Malang kondisi 2 ini ditentukan bahwa bus Generator 1 adalah *slack bus* dengan tegangan $1 \angle 0^\circ$ p.u, sedangkan bus Generator 3 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi (lihat tabel). Sedangkan untuk bus yang lain ditentukan sebagai *PQ bus*. Untuk bus beban dan data saluran dapat dilihat pada pembahasan sebelumnya. Dari hasil simulasi aliran daya di Kondisi 2 diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut:

Tabel 4.7 Data aliran daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 2

No.	Nama Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut ($^\circ$)	P gen (MW)	Q gen (MVar)	P beban (MW)	Q beban (MVar)
1	GENERATOR 1	1	0	2,2841	1,3923	0	0
2	GENERATOR 3	1	-0,2	2	1,4052	0	0
3	UTAMA	0,9821	-1,5	0	0	0	0
4	INJEKSI BARU	0,9721	-1,66	0	0	0,204	0,1264
5	TIMB. GILING	0,9743	-1,31	0	0	0,017	0,0105
6	CVP+CULTROG	0,9721	-1,66	0	0	0,204	0,1264
7	DB 13	0,9671	-1,74	0	0	0,204	0,1264
8	VACUM ROBUSI	0,9686	-1,72	0	0	0,2754	0,1707
9	WTP	0,9801	-1,53	0	0	0,068	0,0421
10	MCC 5	0,9796	-1,54	0	0	0,068	0,0421
11	MCC 4	0,978	-1,57	0	0	0,17	0,1054
12	BB 1	0,9771	-1,58	0	0	0,204	0,1264
13	PENERANGAN	0,9812	-1,51	0	0	0,1368	0,0663
14	CRANE GILING	0,9804	-1,53	0	0	0,051	0,0316
15	LIMBAH BESAL	0,9808	-1,49	0	0	0,017	0,0105
16	PEND BAK BAS	0,9799	-1,47	0	0	0,1054	0,0653
17	GRUP 6	0,9686	-1,72	0	0	0,2754	0,1707
18	MCC 6A	0,9776	-1,57	0	0	0,17	0,1054
19	GRUP 5	0,9733	-1,64	0	0	0,204	0,1264
20	GRUP 4	0,9722	-1,66	0	0	0,323	0,2002

No.	Nama Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (°)	P gen (MW)	Q gen (MVar)	P beban (MW)	Q beban (MVar)
21	DB 12	0,9796	-1,54	0	0	0,068	0,0421
22	PEND TURBIN	0,9819	-1,5	0	0	0,017	0,0105
23	DOOR BARU	0,9798	-1,54	0	0	0,0374	0,0232
24	GRUP 10	0,9784	-1,56	0	0	0,102	0,0632
25	GRUP 9	0,977	-1,58	0	0	0,1394	0,0864
26	MCC 9	0,9784	-1,56	0	0	0,102	0,0632
27	DOOR LAMA	0,9733	-1,64	0	0	0,1802	0,1117
28	YOSHIMIN 1	0,9814	-1,51	0	0	0,0374	0,0232
29	YOSHIMIN 2	0,9815	-1,51	0	0	0,034	0,0211
30	MCC 8	0,9671	-1,74	0	0	0,408	0,2529
31	DB 11	0,9738	-1,64	0	0	0,17	0,1054
32	ESP	0,98	-1,52	0	0	0,0986	0,0611
33	JIANGXI JL	0,9803	-1,54	0	0	0,153	0,0948

Sumber : Hasil simulasi

Berdasarkan data hasil simulasi aliran daya tersebut diperoleh data sebagai berikut:

Total Pembangkitan : P = 4,2841 MW

Q = 2,7975 MVar

Total Beban : P = 4,244 MW

Q = 2,6116 MVar

Total Rugi-rugi : P = 0,0401 MW

Q = 0,1859 MVar

4.3.3 Simulasi Aliran Daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 3

Pada simulasi aliran daya PT. Kebon Agung Malang kondisi 2 ini ditentukan bahwa bus Generator 1 adalah *slack bus* dengan tegangan $1 \angle 0^\circ$ p.u. sedangkan bus Generator 3 merupakan *PV bus* dengan daya keluaran bervariasi (lihat tabel). Sedangkan untuk bus yang lain ditentukan sebagai *PQ bus*. Untuk data bus beban, data beban tambahan dan data saluran dapat dilihat pada pembahasan sebelumnya. Dari hasil simulasi aliran daya di Kondisi 3 diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut:

Tabel 4.8 Data aliran daya PT. Kebon Agung Malang Kondisi 3

No.	Nama Bus	Tegangan (p.u.)	Sudut (°)	P gen (MW)	Q gen (MVar)	P beban (MW)	Q beban (MVar)
1	GENERATOR 1	1	0	2,5274	1,472	0	0
2	GENERATOR 3	1	-0,36	2	1,4952	0	0
3	UTAMA	0,981	-1,67	0	0	0	0
4	INJEKSI BARU	0,9711	-1,83	0	0	0,204	0,1264
5	TIMB. GILING	0,9732	-1,47	0	0	0,017	0,0105
6	CVP+CULTROG	0,9711	-1,83	0	0	0,204	0,1264
7	DB 13	0,966	-1,91	0	0	0,204	0,1264
8	VACUM ROBUSI	0,9675	-1,89	0	0	0,2754	0,1707
9	WTP	0,9791	-1,7	0	0	0,068	0,0421
10	MCC 5	0,9785	-1,71	0	0	0,068	0,0421
11	MCC 4	0,9769	-1,73	0	0	0,17	0,1054
12	BB 1	0,9761	-1,75	0	0	0,204	0,1264
13	PENERANGAN	0,9801	-1,67	0	0	0,1368	0,0663
14	CRANE GILING	0,9794	-1,69	0	0	0,051	0,0316
15	LIMBAH BESAL	0,9798	-1,66	0	0	0,017	0,0105
16	PEND BAK BAS	0,9789	-1,64	0	0	0,1054	0,0653
17	GRUP 6	0,9675	-1,89	0	0	0,2754	0,1707
18	MCC 6A	0,9765	-1,74	0	0	0,17	0,1054
19	GRUP 5	0,9722	-1,81	0	0	0,204	0,1264
20	GRUP 4	0,9712	-1,83	0	0	0,323	0,2002
21	DB 12	0,9785	-1,71	0	0	0,068	0,0421
22	PEND TURBIN	0,9809	-1,67	0	0	0,017	0,0105
23	DOOR BARU	0,9787	-1,7	0	0	0,0374	0,0232
24	GRUP 10	0,9773	-1,73	0	0	0,102	0,0632
25	GRUP 9	0,9759	-1,75	0	0	0,1394	0,0864
26	MCC 9	0,9773	-1,73	0	0	0,102	0,0632
27	DOOR LAMA	0,9722	-1,81	0	0	0,1802	0,1117
28	YOSHIMIN 1	0,9803	-1,68	0	0	0,0374	0,0232
29	YOSHIMIN 2	0,9805	-1,68	0	0	0,034	0,0211
30	MCC 8	0,966	-1,91	0	0	0,408	0,2529
31	DB 11	0,9727	-1,8	0	0	0,17	0,1054
32	ESP	0,9789	-1,69	0	0	0,0986	0,0611
33	JIANGXI JL	0,9793	-1,71	0	0	0,153	0,0948
34	GRUP 1	0,9785	-1,71	0	0	0,068	0,0421
35	GRUP 2	0,9772	-1,73	0	0	0,1054	0,0653
36	GRUP 3	0,9798	-1,69	0	0	0,034	0,0211
37	LIMBAH	0,9805	-1,66	0	0	0,034	0,0211

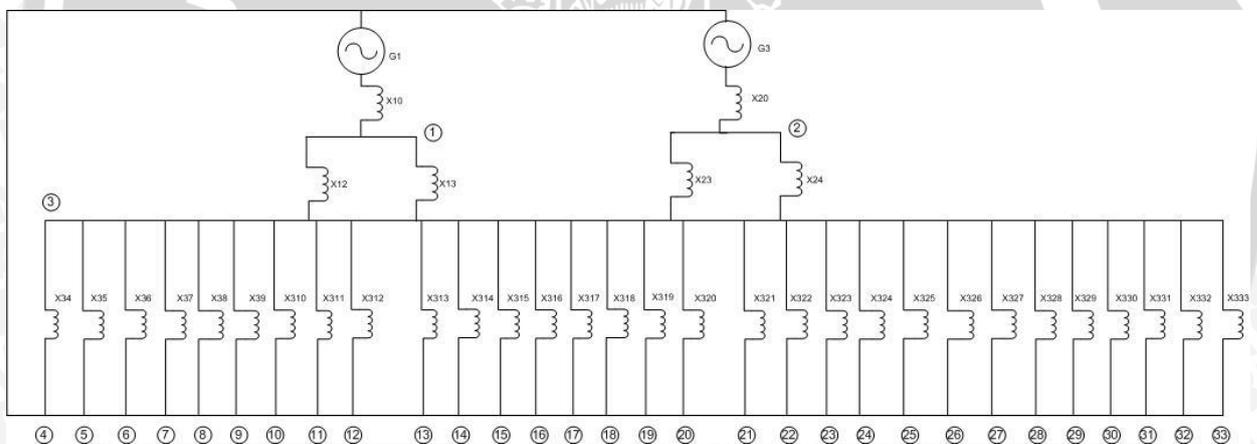
Sumber : Hasil simulasi

Berdasarkan data hasil simulasi aliran daya tersebut diperoleh data sebagai berikut:

Total Pembangkitan	: P = 4,5274 MW
	Q = 2,9672 MVar
Total Beban	: P = 4,4854 MW
	Q = 2,7612 MVar
Total Rugi-rugi	: P = 0,042 MW
	Q = 0,206 MVar

4.4 Rangkaian Ekuivalen Sistem

Rangkaian ekuivalen dari sistem daya setelah penambahan kapasitas generator pembangkit ditunjukkan pada diagram saluran tunggal yang tersaji dalam Gambar 4.4. Dalam gambar tersebut nilai reaktansinya merupakan reaktansi dalam p.u. Gambar rangkaian ekuivalen tersebut akan digunakan untuk perhitungan reaktansi ekuivalen sistem sebelum gangguan, selama gangguan, dan setelah gangguan terjadi.



Gambar 4.4 Rangkaian Ekuivalen Sistem saat Kondisi 2

Sumber : Hasil perhitungan

Dalam melakukan penyederhanaan rangkaian di atas, perlu dilakukan beberapa transformasi impedansi Δ -Y maupun transformasi Y- Δ sesuai dengan yang tercantum dalam (Grainger & Stevenson, 1994:22). Selanjutnya akan dilakukan penyederhanaan rangkaian pada kondisi sebelum, selama, dan setelah terjadi gangguan dengan melakukan beberapa transformasi Δ -Y maupun Y- Δ melalui beberapa tambahan titik bantuan. Untuk memudahkan penyederhanaan rangkaian, maka proses perhitungan dilakukan menggunakan *m.file* pada *MATLAB*. Data reaktansi dapat dilihat pada lampiran 8.

4.4.1 Rangkaian Ekuivalen Sebelum Gangguan

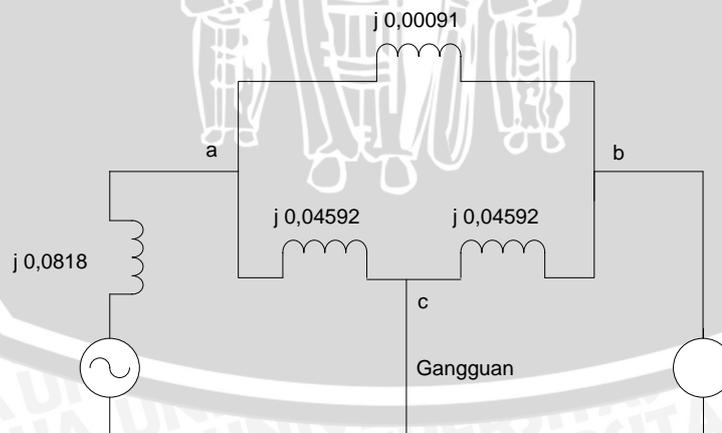
Setelah dilakukan penyederhanaan rangkaian dengan menggunakan transformasi *delta-wye* (Δ - Y) maupun *wye-delta* (Y - Δ) sesuai dengan yang tercantum dalam (Grainger & Stevenson, 1994:22), maka dilakukan perhitungan dengan bantuan MATLAB yang memiliki listing program seperti pada lampiran 9. Sehingga didapatkan nilai reaktansi total sebelum gangguan yaitu sebesar 0,0127 p.u.



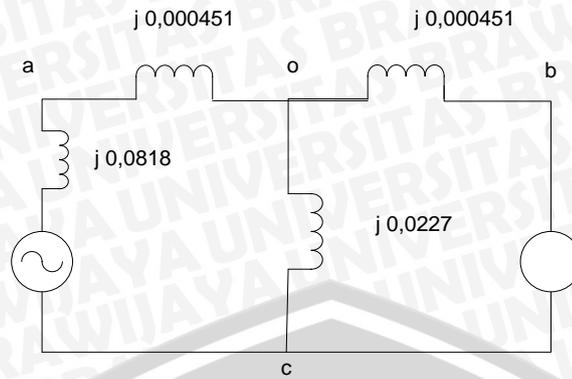
Gambar 4.5 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.4 sebelum gangguan
Sumber : Hasil Perhitungan

4.4.2 Rangkaian Ekuivalen Saat Gangguan

Setelah dilakukan penyederhanaan rangkaian dengan menggunakan transformasi *delta-wye* (Δ - Y) maupun *wye-delta* (Y - Δ) sesuai dengan yang tercantum dalam (Grainger & Stevenson, 1994:22), maka dilakukan perhitungan dengan bantuan MATLAB yang memiliki listing program seperti pada lampiran 10. Sehingga didapatkan nilai reaktansi total saat gangguan yaitu sebesar 0,0843 p.u.

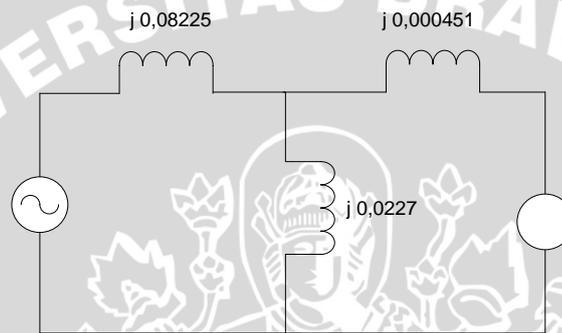


Gambar 4.6 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.4 saat gangguan
Sumber : Hasil Perhitungan



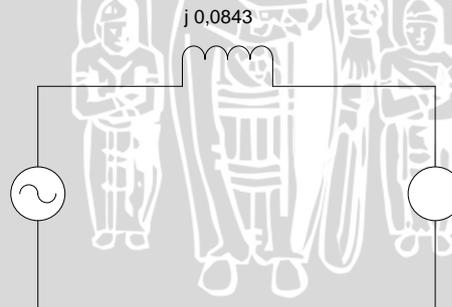
Gambar 4.7 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.6

Sumber : Hasil Perhitungan



Gambar 4.8 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.7

Sumber : Hasil Perhitungan

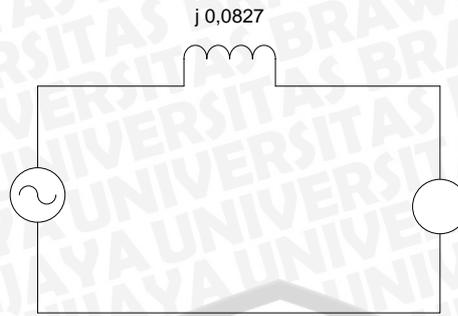


Gambar 4.9 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.8

Sumber : Hasil Perhitungan

4.4.3 Rangkaian Ekuivalen Setelah Gangguan

Setelah dilakukan penyederhanaan rangkaian dengan menggunakan transformasi *delta-wye* (Δ - Y) maupun *wye-delta* (Y - Δ) sesuai dengan yang tercantum dalam (Grainger & Stevenson, 1994:22), maka didapatkan nilai reaktansi total setelah gangguan yaitu sebesar 0,0827 p.u.



Gambar 4.10 Rangkaian penyederhanaan Gambar 4.4 setelah gangguan
 Sumber : Hasil Perhitungan

4.5 Persamaan Sudut Daya

Untuk melakukan perhitungan kondisi sudut rotor generator, maka nilai pembangkitan setiap generator dan tegangan dalam peralihan generator perlu dihitung terlebih dahulu. Nilai pembangkitan generator diperoleh melalui tabel aliran daya pada kondisi 2. Perhitungan tegangan dalam peralihan generator akan dilakukan menggunakan Persamaan 4-2 (Grainger & Stevenson, 1994:102) berikut:

$$E' = V_t + jX'_d \cdot I_t \tag{4-2}$$

4.5.1 Generator 1

Daya generator 1 diperoleh berdasarkan Tabel 4.7, yaitu:

$$(P_1 - jQ_1) = 2,2841 - j1,3923$$

Selanjutnya nilai daya tersebut digunakan untuk menghitung arus keluaran dari generator, sehingga:

$$\begin{aligned} I_t &= \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} \\ &= \frac{2,2841 - j1,3923}{1 - j0} \\ &= 2,2841 - j1,3923 \text{ p.u.} \end{aligned}$$

Tegangan dalam peralihan generator adalah :

$$\begin{aligned} E' &= V_1 + jX'_d \cdot I_1 \\ &= 1 + j0,28 \cdot (2,2841 - j1,3923) \\ &= 1,3898 + j0,6395 \text{ p.u.} \\ &= 1,529 \angle 24,7^\circ \end{aligned}$$

Selanjutnya persamaan sudut daya pada kondisi sebelum, selama, dan setelah gangguan akan dianalisis menggunakan Persamaan (2-39) :



Daya sebelum gangguan,

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{E_1 \cdot E'}{X_{\text{sebelum gangguan}}} \sin \delta \\ &= \frac{1 \cdot 1,529}{0,0127} \sin \delta \\ &= 120,39 \sin \delta \end{aligned}$$

Daya selama gangguan,

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{E_1 \cdot E'}{X_{\text{selama gangguan}}} \sin \delta \\ &= \frac{1 \cdot 1,529}{0,0843} \sin \delta \\ &= 18,137 \sin \delta \end{aligned}$$

Daya setelah gangguan,

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{E_1 \cdot E'}{X_{\text{setelah gangguan}}} \sin \delta \\ &= \frac{1 \cdot 1,529}{0,0827} \sin \delta \\ &= 18,49 \sin \delta \end{aligned}$$

Nilai δ_0 dan δ_{maks} dapat diperoleh menggunakan persamaan :

$$P_e = P_{maks} \sin \delta_0 \quad \text{dan,}$$

$$P_e = r_2 P_{maks} \sin \delta_{maks}$$

Sehingga diperoleh,

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{2,2841}{120,39}$$

$$= 1,08^\circ$$

$$= 0,0189 \text{ radian}$$

$$\delta_{maks} = \pi - \sin^{-1} \frac{2,2841}{18,49}$$

$$= 180^\circ - 7,1^\circ$$

$$= 172,9^\circ$$

$$= 3,016 \text{ radian}$$

Variabel – variable persamaan reaktansi dan sudut daya tersebut akan digunakan untuk mengetahui perubahan sudut rotor, frekuensi dan waktu pemutusan kritis.

4.6 Perhitungan dengan Metode Runge-Kutte

Perhitungan perubahan sudut rotor dan frekuensi saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa ke tanah akan dianalisis menggunakan metode Runge-Kutte. Perbedaan variabel seperti reaktansi, konstanta inersia, sudut minimum dan daya masukan mekanis membuat perubahan sudut rotor dan frekuensi antara generator satu dengan generator yang lain menjadi berbeda. Sebagian proses perhitungan akan dilakukan pada generator 1 yang mewakili sistem.

Variabel –variabel yang digunakan adalah:

$$\Delta t = 0,05 \text{ detik}$$

$$\omega_s = 314,15927 \text{ radian/detik}$$

$$\omega_0 = 314,15927 \text{ radian/detik}$$

$$H = 6 \text{ MJ/MVA}$$

$$\delta_0 = 0,0189 \text{ radian}$$

$$P_e = 18,137 \sin \delta$$

$$P_m = 2,2841$$

Berdasarkan variabel – variabel tersebut, akan dilakukan analisis perubahan sudut rotor dan kecepatan sudut generator dengan metode Runge-Kutte sebagai berikut:

Pada $t = 0,05$ detik

Perkiraan pertama:

$$\begin{aligned} k_1 &= (\omega_0 - \omega_s) \Delta t \\ &= (314,15927 - 314,15927) 0,05 \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} p_e^{(1)} &= 18,137 \sin \delta_0 \\ &= 18,137 \sin 0,0189 \\ &= 0,3427 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{2\pi f}{2H} (P_m - P_e^{(1)}) \Delta t \\ &= \frac{3,1416 * 50}{6} (2,2841 - 0,3427) 0,05 \\ &= 2,54 \end{aligned}$$

Perkiraan kedua:

$$\begin{aligned} k_2 &= \left\{ \left(\omega_0 + \frac{l_1}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t \\ &= \left\{ \left(314,15927 + \frac{2,54}{2} \right) - 314,15927 \right\} 0,05 \\ &= 0,0635 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_e^{(2)} &= 18,137 \sin \left(\delta_0 + \frac{k_1}{2} \right) \\ &= 18,137 \sin \left(0,0189 + \frac{0}{2} \right) \\ &= 0,3428 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_2 &= \frac{2\pi f}{2H} (P_m - P_e^{(2)}) \Delta t \\ &= \frac{3,1416 * 50}{6} (2,2841 - 0,3428) 0,05 \\ &= 2,5412 \end{aligned}$$

Perkiraan ketiga:

$$\begin{aligned} k_3 &= \left\{ \left(\omega_0 + \frac{l_2}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t \\ &= \left\{ \left(314,15927 + \frac{2,5412}{2} \right) - 314,15927 \right\} 0,05 \\ &= 0,0635 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_e^{(3)} &= 18,137 \sin \left(\delta_0 + \frac{k_2}{2} \right) \\ &= 18,137 \sin \left(0,0189 + \frac{0,0635}{2} \right) \\ &= 0,9185 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_3 &= \frac{2\pi f}{2H} (P_m - P_e^{(3)}) \Delta t \\ &= \frac{3,1416 * 50}{6} (2,2841 - 0,9185) 0,05 \\ &= 1,7875 \end{aligned}$$

Perkiraan keempat:

$$k_4 = \left\{ \left(\omega_0 + \frac{l_3}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t$$

$$= \left\{ \left(314,15927 + \frac{1,7875}{2} \right) - 314,15927 \right\} 0,05$$

$$= 0,0447$$

$$P_e^{(4)} = 18,137 \sin \left(\delta_0 + \frac{k_3}{2} \right)$$

$$= 18,137 \sin \left(0,0189 + \frac{0,03716}{2} \right)$$

$$= 0,9185$$

$$l_4 = \frac{2\pi f}{2H} (P_m - P_e^{(4)}) \Delta t$$

$$= \frac{3,1416 * 50}{6} (2,2841 - 0,9185) 0,05$$

$$= 1,7875$$

diperoleh nilai sudut daya dan kecepatan sudut:

$$\delta_1 = \delta_0 + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) = 0,0687 \text{ radian}$$

$$\omega_1 = \omega_0 + \frac{1}{6} (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) = 316,3236 \text{ radian/detik}$$

Pada $t = 0,1$ detik

Perkiraan pertama:

$$k_1 = (\omega_1 - \omega_s) \Delta t$$

$$= (316,3236 - 314,15927) 0,05$$

$$= 0,1082$$

$$P_e^{(1)} = 18,137 \sin \delta_1$$

$$= 18,137 \sin 0,0687$$

$$= 1,2451$$

$$l_1 = \frac{2\pi f}{2H} (P_m - P_e^{(1)}) \Delta t$$

$$= \frac{3,1416 * 50}{6} (2,2841 - 1,2451) 0,05$$

$$= 1,3601$$

Perkiraan kedua:

$$k_2 = \left\{ \left(\omega_1 + \frac{l_1}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t$$

$$= \left\{ \left(316,3236 + \frac{1,3601}{2} \right) - 314,15927 \right\} 0,05$$

$$= 0,1422$$

$$P_e^{(2)} = 18,137 \sin \left(\delta_1 + \frac{k_1}{2} \right)$$

$$= 18,137 \sin \left(0,0687 + \frac{0,1082}{2} \right)$$

$$= 2,2218$$

$$l_2 = \frac{2\pi f}{2H} (P_m - P_e^{(2)}) \Delta t$$

$$= \frac{3,1416 * 50}{6} (2,2841 - 2,2218) 0,05$$

$$= 0,0815$$

Perkiraan ketiga:

$$k_3 = \left\{ \left(\omega_1 + \frac{l_2}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t$$

$$= \left\{ \left(316,3236 + \frac{0,0815}{2} \right) - 314,15927 \right\} 0,05$$

$$= 0,1103$$

$$P_e^{(3)} = 18,137 \sin \left(\delta_1 + \frac{k_2}{2} \right)$$

$$= 18,137 \sin \left(0,0687 + \frac{0,1422}{2} \right)$$

$$= 2,527$$

$$l_3 = \frac{2\pi f}{2H} (P_m - P_e^{(3)}) \Delta t$$

$$= \frac{3,1416 * 50}{6} (2,2841 - 2,527) 0,05$$

$$= -0,3186$$

Perkiraan keempat:

$$k_4 = \left\{ \left(\omega_1 + \frac{l_3}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t$$

$$= \left\{ \left(316,3236 + \frac{-0,3186}{2} \right) - 314,15927 \right\} 0,05$$

$$= 0,1003$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(4)} &= 18,137 \sin\left(\delta_1 + \frac{k_3}{2}\right) \\
 &= 18,137 \sin\left(0,0687 + \frac{0,1103}{2}\right) \\
 &= 2,2402 \\
 l_4 &= \frac{2\pi f}{2H} (P_m - P_e^{(4)}) \Delta t \\
 &= \frac{3,1416 * 50}{6} (2,2841 - 2,2402) 0,05 \\
 &= 0,0575
 \end{aligned}$$

diperoleh nilai sudut daya dan kecepatan sudut:

$$\begin{aligned}
 \delta_2 &= \delta_1 + \frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) = 0,1876 \text{ radian} \\
 \omega_2 &= \omega_1 + \frac{1}{6} (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) = 316,4809 \text{ radian/detik}
 \end{aligned}$$

Untuk proses perhitungan pada t selanjutnya akan dikerjakan melalui proses simulasi menggunakan perangkat lunak *PSSE (Power System Simulator for Engineering)*.

4.7 Representasi Saluran Transmisi

Proses penyaluran daya pada sistem tenaga listrik diawali dari pembangkitan, kemudian disalurkan melalui sistem jaringan transmisi, lalu disalurkan kepada pelanggan distribusi. Berdasarkan Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia mengenai aturan jaringan sistem tenaga listrik pada tahun 2007, karakteristik unjuk kerja jaringan transmisi harus memenuhi persyaratan-persyaratan :

- Frekuensi nominal 50 Hz, diusahakan tidak lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih tinggi dari 50,5 Hz, dan selama keadaan darurat (*emergency*) dan gangguan, frekuensi sistem diijinkan turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52 Hz.
- Tegangan sistem harus dipertahankan dalam batasan yang dituliskan dalam Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Batas Tegangan pada Jaringan Transmisi

Tegangan Nominal	Batas Atas	Batas Bawah
500 kV	+5%	-5%
150 kV	+5%	-10%
70 kV	+5%	-10%
20 kV	+5%	-10%

Sumber : Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, 2007:7

- c. Faktor daya ($\cos \phi$) pada jaringan transmisi sebesar 0,85 lagging.
- d. Waktu Pemutusan Gangguan
 - i. 500 kV : 90 milidetik
 - ii. 150 kV : 120 milidetik
 - iii. 70 kV : 150 milidetik
- e. Dalam hal terjadinya kesalahan peralatan proteksi utama Pemakai Jaringan, maka proteksi cadangan (*back-up*) untuk gangguan di titik sambungan tegangan tinggi pemakai Jaringan yang disediakan oleh Pemakai Jaringan harus disetel dengan waktu pemutusan kurang dari 400 milidetik.

4.8 Simulasi Stabilitas Transien Kondisi 1

Simulasi stabilitas transien kondisi 1 ini meliputi simulasi stabilitas sudut rotor, stabilitas tegangan dan stabilitas frekuensi pada PT. Kebon Agung Malang. Dalam hal ini dilakukan pengaturan meliputi daya dasar 2 MVA, frekuensi 50 Hz, tegangan dasar 0,4 kV, waktu gangguan dimulai detik ke-1, dan waktu gangguan 0,15 detik.

Dalam melakukan simulasi stabilitas transien ini dilakukan beberapa skenario gangguan pada sistem sesuai dengan Tabel 4.10 berikut:

Tabel 4.10 Skenario gangguan kondisi 1

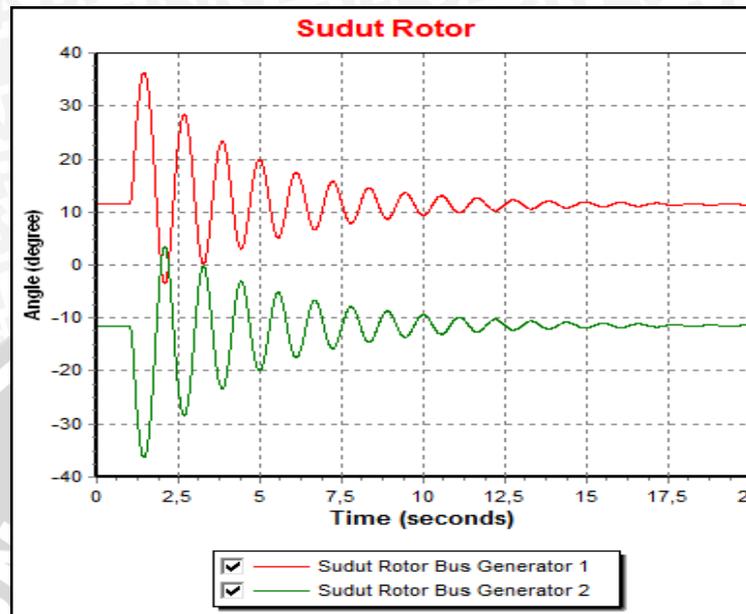
Skenario ke	Letak gangguan
1a	Bus MCC 8
2a	Bus Generator 2

Sumber : Penulis

Data yang ditampilkan berupa data grafik ketika sebelum, saat dan setelah gangguan terjadi sesuai dengan skenario gangguan pada Tabel 4.10. Hasil simulasi pada sistem tenaga di PT. Kebon Agung Malang sesuai dengan pembahasan berikut:

1. Skenario 1a

Hasil simulasi stabilitas sudut rotor skenario gangguan 1a ditunjukkan pada Gambar 4.11 dan Tabel 4.11.



Gambar 4.11 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 1a

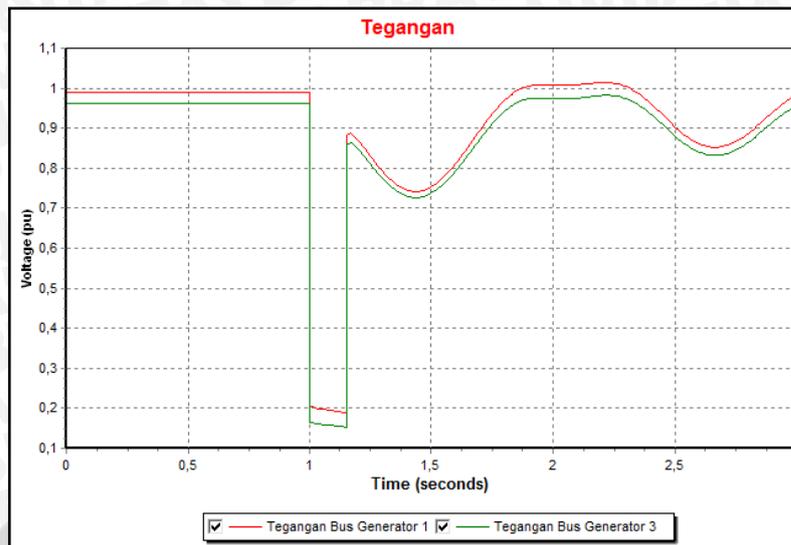
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.11 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 1a

Generator	δ_{awal} (°)	$\delta_{selama\ gangguan}$ (°)		$t_{pemulihan}$ (detik)
		Maks	Min	
Generator 1	11,5727	36,3725	-3,5956	17,6
Generator 2	-11,5727	3,5956	-36,3725	17,6

Sumber : Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi sudut rotor pada Gambar 4.11 dan Tabel 4.11, dapat dilihat perubahan kondisi sudut rotor saat sebelum dan selama terjadi gangguan. Sebelum terjadi gangguan, sudut rotor generator sebesar $11,5727^\circ$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 1 adalah sebesar $36,3725^\circ$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-3,5956^\circ$. Sedangkan kondisi generator 2 pada saat sebelum terjadi gangguan menunjukkan sudut rotor sebesar $-11,5727^\circ$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 2 adalah sebesar $3,5956^\circ$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-36,3725^\circ$. Untuk mencapai keadaan normal kembali, generator 1 dan generator 2 memerlukan waktu yang sama, yaitu 17,6 detik setelah terjadi gangguan.



Gambar 4.12 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 1a

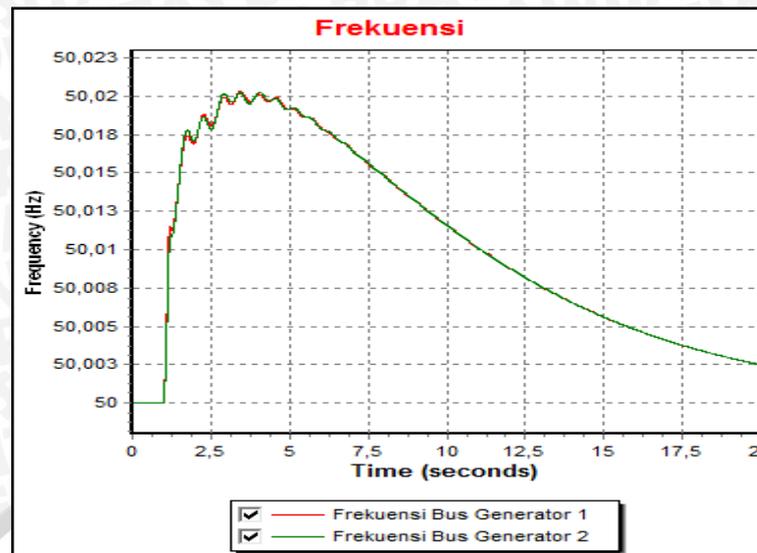
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.12 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 1a

Bus	V_{awal} (p.u.)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
Generator 1	0,9896	0,1865	150
Generator 2	0,9612	0,1522	150

Sumber : Hasil Simulasi

Pada hasil simulasi tersebut menunjukkan tegangan pada bus generator 1 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 0,9896 p.u., kemudian tegangan menurun hingga mencapai 0,1865 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Tegangan kembali mencapai operasi normal setelah mengalami osilasi. Penurunan tegangan yang lebih besar terjadi pada bus generator 2, dimana tegangan sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 0,9612 p.u. kemudian tegangan menurun hingga 0,1522 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Kedua grafik tegangan mengalami penurunan selama 150 milidetik sehingga tegangan sistem masih dalam kondisi stabil.



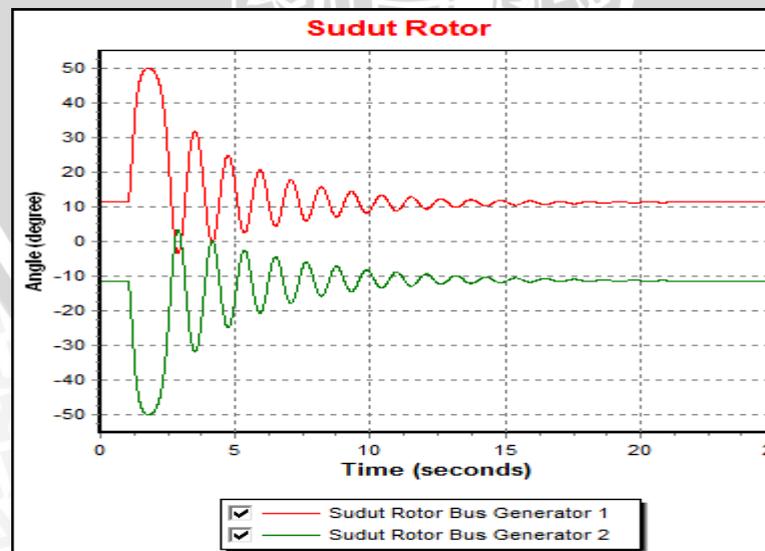
Gambar 4.13 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 1a

Sumber : Hasil Simulasi

Berdasarkan Gambar 4.13 tersebut, frekuensi generator 1 dan generator 2 meningkat sebesar 0,021 Hz ketika mengalami gangguan tiga fasa pada bus MCC 8. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007).

2. Skenario 2a

Hasil simulasi stabilitas sudut rotor skenario gangguan 2a ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan Tabel 4.13.



Gambar 4.14 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 2a

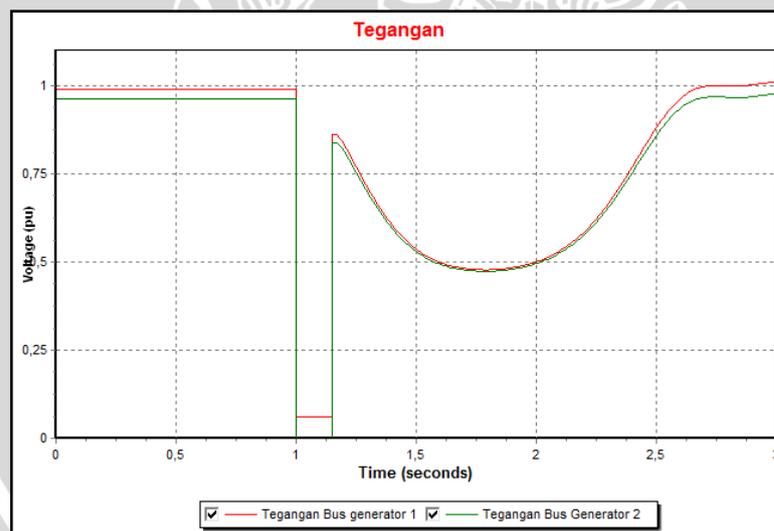
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.13 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 2a

Generator	δ_{awal} (°)	$\delta_{selama\ gangguan}$ (°)		$t_{pemulihan}$ (detik)
		Maks	Min	
Generator 1	11,5727	49,8724	-3,4786	21,69
Generator 2	-11,5727	3,4786	-49,8724	21,69

Sumber : Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi sudut rotor pada Gambar 4.14 dan Tabel 4.13, dapat dilihat perubahan kondisi sudut rotor saat sebelum dan selama terjadi gangguan. Sebelum terjadi gangguan, sudut rotor generator sebesar $11,5727^\circ$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 1 adalah sebesar $49,8724^\circ$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-3,4786^\circ$. Sedangkan kondisi generator 2 pada saat sebelum terjadi gangguan menunjukkan sudut rotor sebesar $-11,5727^\circ$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 2 adalah sebesar $3,4786^\circ$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-49,8724^\circ$. Untuk mencapai keadaan normal kembali, generator 1 dan generator 2 memerlukan waktu yang sama, yaitu 21,69 detik setelah terjadi gangguan.



Gambar 4.15 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 2a

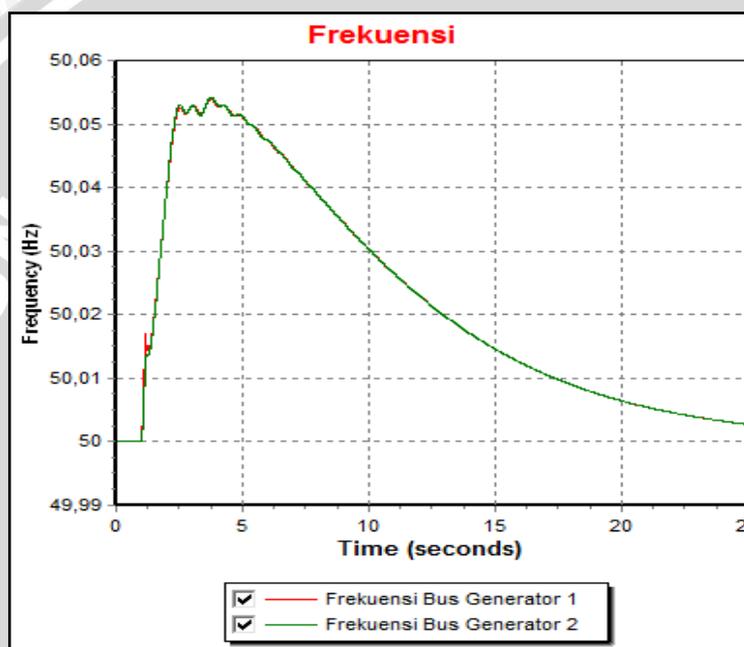
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.14 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 2a

Bus	V_{awal} (p.u.)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (mildetik)
Generator 1	0,9896	0,0602	150
Generator 2	0,9612	$3,6 \times 10^{-9}$	150

Sumber : Hasil Simulasi

Pada hasil simulasi tersebut menunjukkan tegangan pada bus generator 1 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 0,9896 p.u., kemudian tegangan menurun hingga mencapai 0,0602 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Tegangan kembali mencapai operasi normal setelah mengalami osilasi. Penurunan tegangan yang lebih besar terjadi pada bus generator 2, dimana tegangan sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 0,9612 p.u. kemudian tegangan menurun hingga $3,6 \times 10^{-9}$ p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Hal tersebut dikarenakan gangguan terletak pada bus generator 2. Kedua grafik tegangan mengalami penurunan selama 150 milidetik sehingga tegangan sistem masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.16 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 2 saat gangguan skenario 2a

Sumber : Hasil Simulasi

Berdasarkan Gambar 4.16 tersebut, frekuensi generator 1 dan generator 2 meningkat sebesar 0,055 Hz ketika mengalami gangguan tiga fasa pada bus generator 2. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007).

4.9 Simulasi Stabilitas Transien Kondisi 2

Simulasi stabilitas transien kondisi 2 ini meliputi simulasi stabilitas sudut rotor, dan stabilitas tegangan pada PT. Kebon Agung Malang. Dalam hal ini dilakukan pengaturan meliputi frekuensi 50 Hz, daya dasar 2 MVA, tegangan dasar 0,4 kV, waktu

gangguan dimulai detik ke-1, dan waktu gangguan 0,15 detik. Pada kondisi ini akan ditambahkan generator 3, namun dengan melepas generator 2 dari sistem.

Dalam melakukan simulasi stabilitas transien ini dilakukan beberapa skenario gangguan pada sistem sesuai dengan Tabel 4.15 berikut:

Tabel 4.15 Skenario gangguan kondisi 2

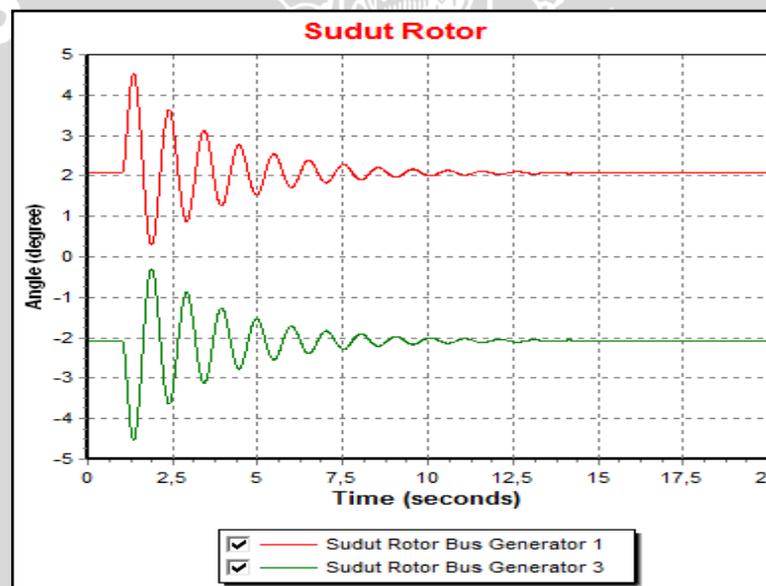
Skenario ke	Letak gangguan
1b	Bus MCC 8
2b	Bus Utama

Sumber : Penulis

Data yang ditampilkan berupa data grafik ketika sebelum, saat dan setelah gangguan terjadi sesuai dengan skenario gangguan pada Tabel 4.15. Hasil simulasi pada sistem tenaga di PT. Kebon Agung Malang sesuai dengan pembahasan berikut:

1. Skenario 1b

Hasil simulasi stabilitas sudut rotor skenario gangguan 1b ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan Tabel 4.16.



Gambar 4.17 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1b

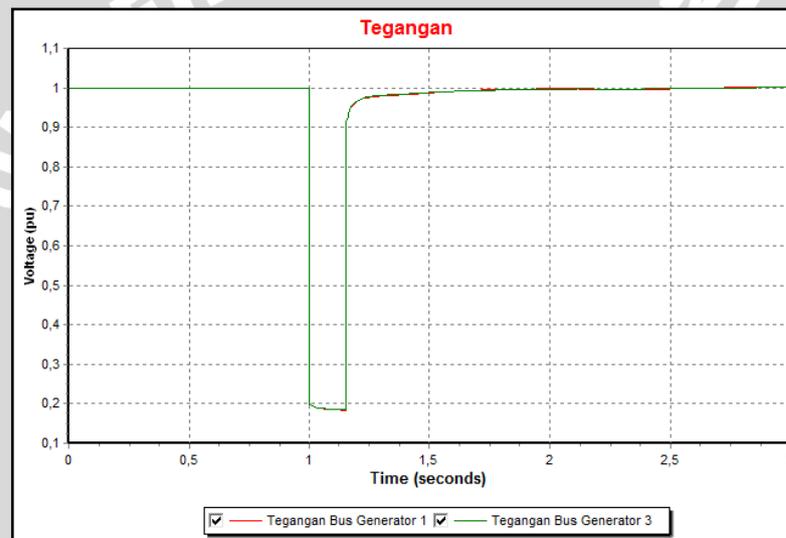
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.16 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 1b

Generator	$\delta_{\text{awal}} (^{\circ})$	$\delta_{\text{selama gangguan}} (^{\circ})$		$t_{\text{pemulihan}} (\text{detik})$
		Maks	Min	
Generator 1	2,0849	4,5331	0,2953	12,4
Generator 3	-2,0849	-0,2953	-4,5331	12,4

Sumber : Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi sudut rotor pada Gambar 4.17 dan Tabel 4.16, dapat dilihat perubahan kondisi sudut rotor saat sebelum dan selama terjadi gangguan. Sebelum terjadi gangguan, sudut rotor generator sebesar $2,0849^\circ$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 1 adalah sebesar $4,5331^\circ$ dan penurunan sudut rotor sebesar $0,2953^\circ$. Sedangkan kondisi generator 3 pada saat sebelum terjadi gangguan menunjukkan sudut rotor sebesar $-2,0849^\circ$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 3 adalah sebesar $-0,2953^\circ$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-4,5331^\circ$. Untuk mencapai keadaan normal kembali, generator 1 dan generator 3 memerlukan waktu yang sama, yaitu 12,4 detik setelah terjadi gangguan.



Gambar 4.18 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1b

Sumber : Hasil Simulasi

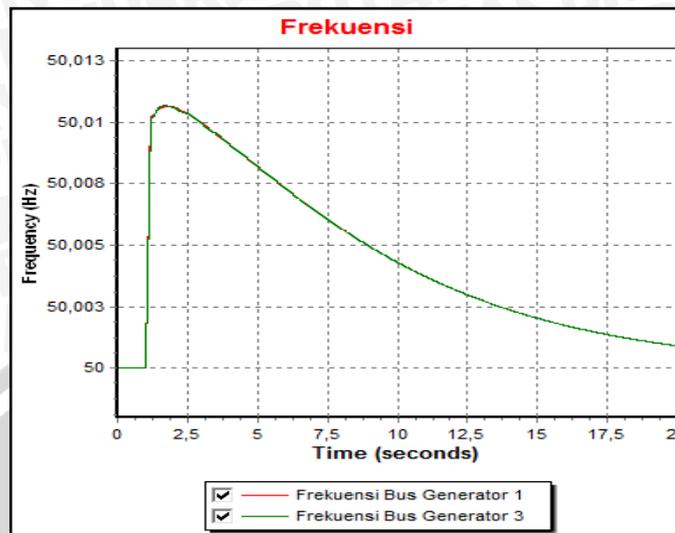
Tabel 4.17 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 1b

Bus	V_{awal} (p.u.)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
Generator 1	1	0,1837	150
Generator 3	1	0,1851	150

Sumber : Hasil Simulasi

Pada hasil simulasi tersebut menunjukkan tegangan pada bus generator 1 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 1 p.u., kemudian tegangan menurun hingga mencapai 0,1837 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Tegangan kembali mencapai operasi normal setelah mengalami penurunan. Sedangkan tegangan pada bus generator 3 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 1 p.u. kemudian tegangan menurun hingga 0,1851 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Kedua grafik

tegangan mengalami penurunan selama 150 milidetik sehingga tegangan sistem masih dalam kondisi stabil.



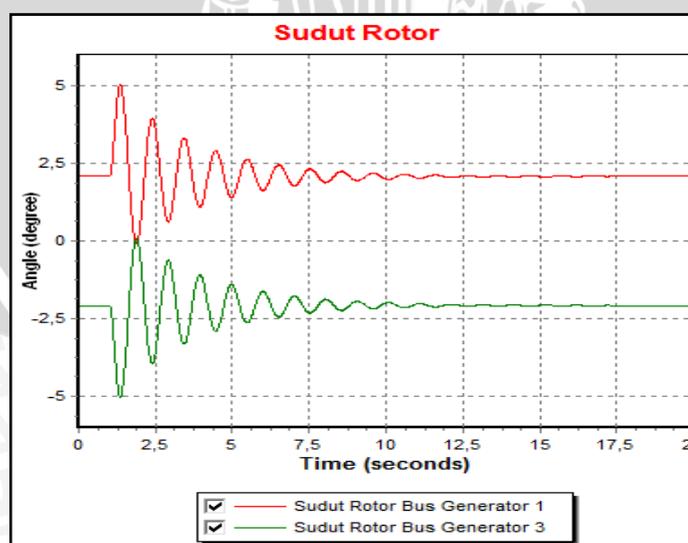
Gambar 4.19 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1b

Sumber : Hasil Simulasi

Berdasarkan Gambar 4.19 tersebut, frekuensi generator 1 dan generator 3 meningkat sebesar 0,011 Hz ketika mengalami gangguan tiga fasa pada bus MCC 8. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007).

2. Skenario 2b

Hasil simulasi stabilitas sudut rotor skenario gangguan 2b ditunjukkan pada Gambar 4.20 dan Tabel 4.18.



Gambar 4.20 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2b

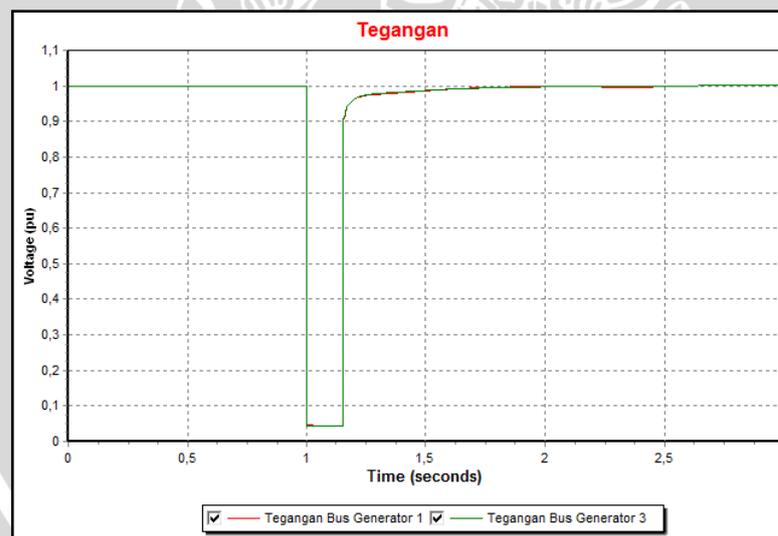
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.18 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 2b

Generator	$\delta_{\text{awal}} (^{\circ})$	$\delta_{\text{selama gangguan}} (^{\circ})$		$t_{\text{pemulihan}} (\text{detik})$
		Maks	Min	
Generator 1	2,0849	5,03	-0,0707	12,53
Generator 3	-2,0849	0,0707	-5,03	12,53

Sumber : Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi sudut rotor pada Gambar 4.20 dan Tabel 4.18, dapat dilihat perubahan kondisi sudut rotor saat sebelum dan selama terjadi gangguan. Sebelum terjadi gangguan, sudut rotor generator sebesar $2,0849^{\circ}$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 1 adalah sebesar $5,03^{\circ}$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-0,0707^{\circ}$. Sedangkan kondisi generator 3 pada saat sebelum terjadi gangguan menunjukkan sudut rotor sebesar $-2,0849^{\circ}$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 3 adalah sebesar $0,0707^{\circ}$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-5,03^{\circ}$. Untuk mencapai keadaan normal kembali, generator 1 dan generator 3 memerlukan waktu yang sama, yaitu 12,53 detik setelah terjadi gangguan.



Gambar 4.21 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2b

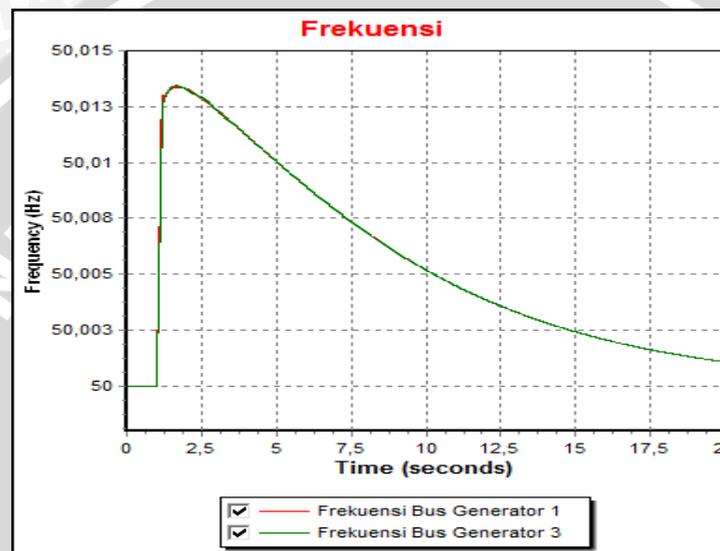
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.19 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 2b

Bus	$V_{\text{awal}} (\text{p.u.})$	$V_{\text{drop}} (\text{p.u.})$	$t_{\text{drop}} (\text{mildetik})$
Generator 1	1	0,0443	150
Generator 3	1	0,0425	150

Sumber : Hasil Simulasi

Pada hasil simulasi tersebut menunjukkan tegangan pada bus generator 1 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 1 p.u., kemudian tegangan menurun hingga mencapai 0,0443 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Tegangan kembali mencapai operasi normal setelah mengalami penurunan. Sedangkan tegangan pada bus generator 3 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 1 p.u. kemudian tegangan menurun hingga 0,0425 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Kedua grafik tegangan mengalami penurunan selama 150 milidetik sehingga tegangan sistem masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.22 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2b

Sumber : Hasil Simulasi

Berdasarkan Gambar 4.22 tersebut, frekuensi generator 1 dan generator 3 meningkat sebesar 0,014 Hz ketika mengalami gangguan tiga fasa pada bus utama. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007).

4.10 Simulasi Stabilitas Transien Kondisi 3

Simulasi stabilitas transien kondisi 3 ini meliputi simulasi stabilitas sudut rotor dan stabilitas tegangan pada PT. Kebon Agung Malang. Dalam hal ini dilakukan pengaturan meliputi frekuensi 50 Hz, daya dasar 2 MVA, tegangan dasar 0,4 kV, waktu gangguan dimulai detik ke-1, dan waktu gangguan 0,15 detik. Kondisi 3 ini sama dengan kondisi 2 tetapi akan ditambahkan empat buah bus beban yang terhubung dengan bus utama.

Dalam melakukan simulasi stabilitas transien ini dilakukan beberapa skenario gangguan pada sistem sesuai dengan Tabel 4.20 berikut:

Tabel 4.20 Skenario gangguan kondisi 3

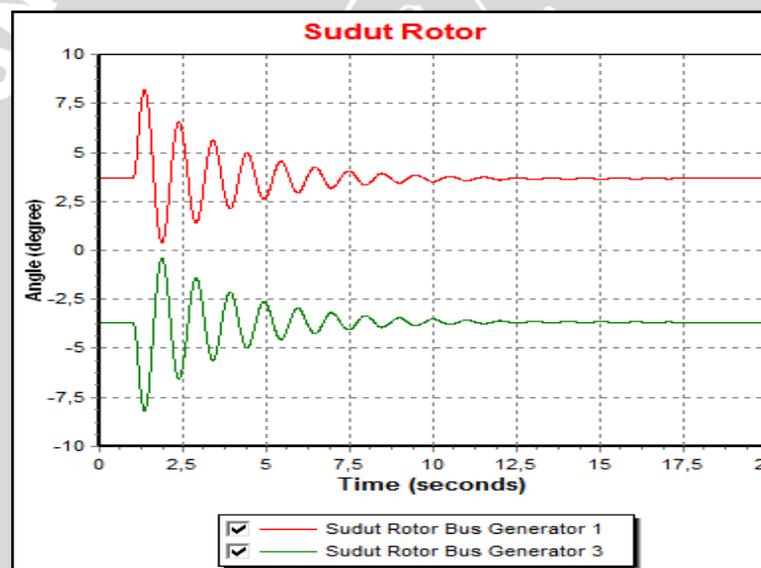
Skenario ke	Letak gangguan
1c	Bus MCC 8
2c	Bus Utama

Sumber : Penulis

Data yang ditampilkan berupa data grafik ketika sebelum, saat dan setelah gangguan terjadi sesuai dengan skenario gangguan pada Tabel 4.20. Hasil simulasi pada sistem tenaga di PT. Kebon Agung Malang sesuai dengan pembahasan berikut:

1. Skenario 1c

Hasil simulasi stabilitas sudut rotor skenario gangguan 1c ditunjukkan pada Gambar 4.23 dan Tabel 4.21.



Gambar 4.23 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1c

Sumber : Hasil Simulasi

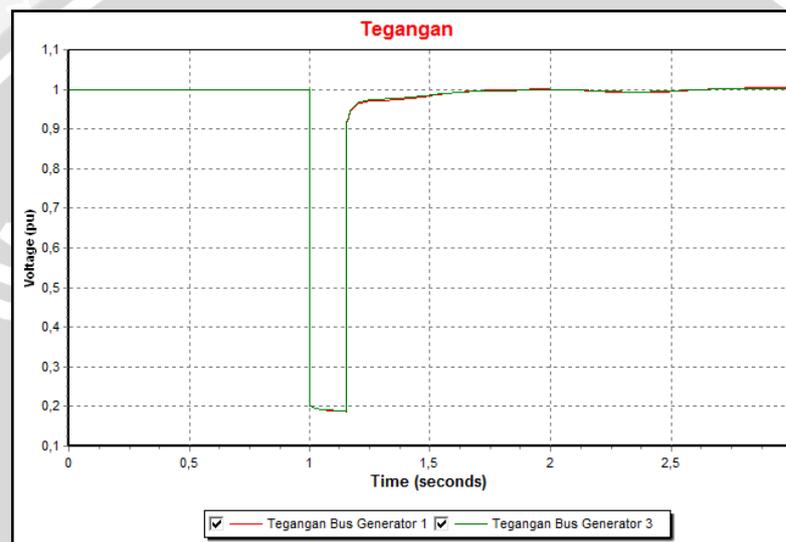
Tabel 4.21 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 1c

Generator	$\delta_{\text{awal}} (^{\circ})$	$\delta_{\text{selama gangguan}} (^{\circ})$		$t_{\text{pemulihan}} (\text{detik})$
		Maks	Min	
Generator 1	3,6751	8,1739	0,3731	12,71
Generator 3	-3,6751	-0,3731	-8,1739	12,71

Sumber : Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi sudut rotor pada Gambar 4.23 dan Tabel 4.21, dapat dilihat perubahan kondisi sudut rotor saat sebelum dan selama terjadi gangguan. Sebelum

terjadi gangguan, sudut rotor generator sebesar $3,6751^\circ$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 1 adalah sebesar $8,1739^\circ$ dan penurunan sudut rotor sebesar $0,3731^\circ$. Sedangkan kondisi generator 3 pada saat sebelum terjadi gangguan menunjukkan sudut rotor sebesar $-3,6751^\circ$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 3 adalah sebesar $-0,3731^\circ$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-8,1739^\circ$. Untuk mencapai keadaan normal kembali, generator 1 dan generator 3 memerlukan waktu yang sama, yaitu 12,71 detik setelah terjadi gangguan.



Gambar 4.24 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1c

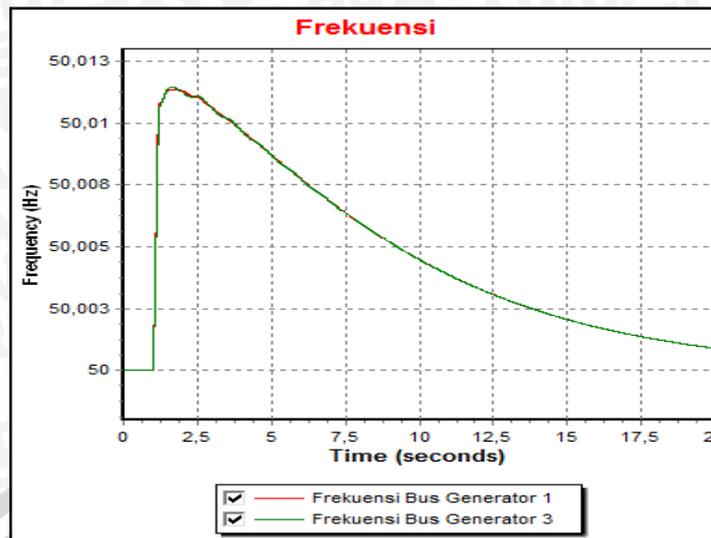
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.22 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 1c

Bus	V_{awal} (p.u.)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
Generator 1	1	0,1871	150
Generator 3	1	0,1895	150

Sumber : Hasil Simulasi

Pada hasil simulasi tersebut menunjukkan tegangan pada bus generator 1 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 1 p.u., kemudian tegangan menurun hingga mencapai 0,1871 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Tegangan kembali mencapai operasi normal setelah mengalami penurunan. Sedangkan tegangan pada bus generator 3 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 1 p.u. kemudian tegangan menurun hingga 0,1895 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Kedua grafik tegangan mengalami penurunan selama 150 milidetik sehingga tegangan sistem masih dalam kondisi stabil.



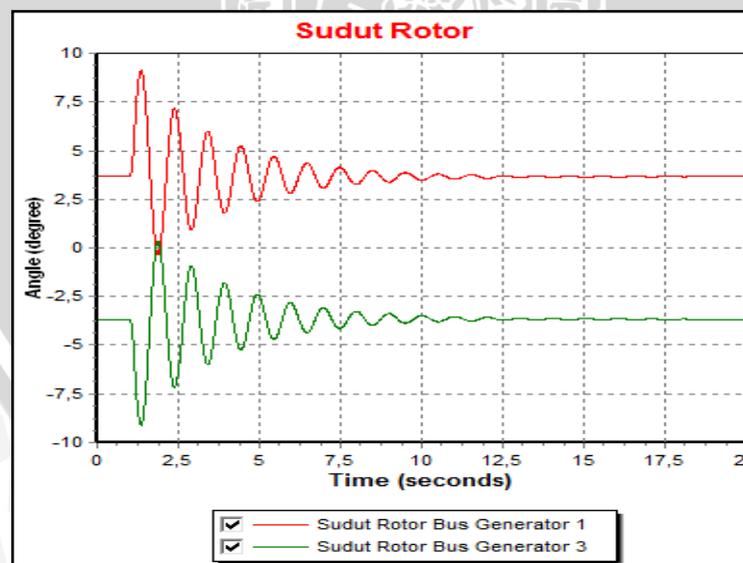
Gambar 4.25 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 1c

Sumber : Hasil Simulasi

Berdasarkan Gambar 4.25 tersebut, frekuensi generator 1 dan generator 3 meningkat sebesar 0,012 Hz ketika mengalami gangguan tiga fasa pada bus utama. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007).

2. Skenario 2c

Hasil simulasi stabilitas sudut rotor skenario gangguan 2c ditunjukkan pada Gambar 4.26 dan Tabel 4.23.



Gambar 4.26 Grafik sudut rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2c

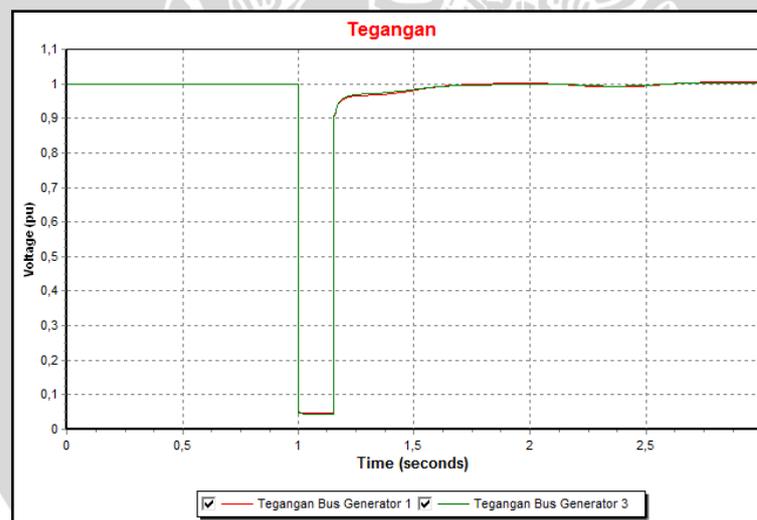
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.23 Simulasi stabilitas sudut rotor pada skenario 2c

Generator	$\delta_{\text{awal}} (^{\circ})$	$\delta_{\text{selama gangguan}} (^{\circ})$		$t_{\text{pemulihan}} (\text{detik})$
		Maks	Min	
Generator 1	3,6751	9,1214	-0,3219	13,73
Generator 3	-3,6751	0,321	-9,1214	13,73

Sumber : Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi sudut rotor pada Gambar 4.26 dan Tabel 4.23, dapat dilihat perubahan kondisi sudut rotor saat sebelum dan selama terjadi gangguan. Sebelum terjadi gangguan, sudut rotor generator sebesar $3,6751^{\circ}$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 1 adalah sebesar $9,1214^{\circ}$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-0,3219^{\circ}$. Sedangkan kondisi generator 3 pada saat sebelum terjadi gangguan menunjukkan sudut rotor sebesar $-3,6751^{\circ}$. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan dengan kenaikan maksimum sudut rotor pada generator 3 adalah sebesar $0,321^{\circ}$ dan penurunan sudut rotor sebesar $-9,1214^{\circ}$. Untuk mencapai keadaan normal kembali, generator 1 dan generator 3 memerlukan waktu yang sama, yaitu 13,73 detik setelah terjadi gangguan.



Gambar 4.27 Grafik tegangan pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2c

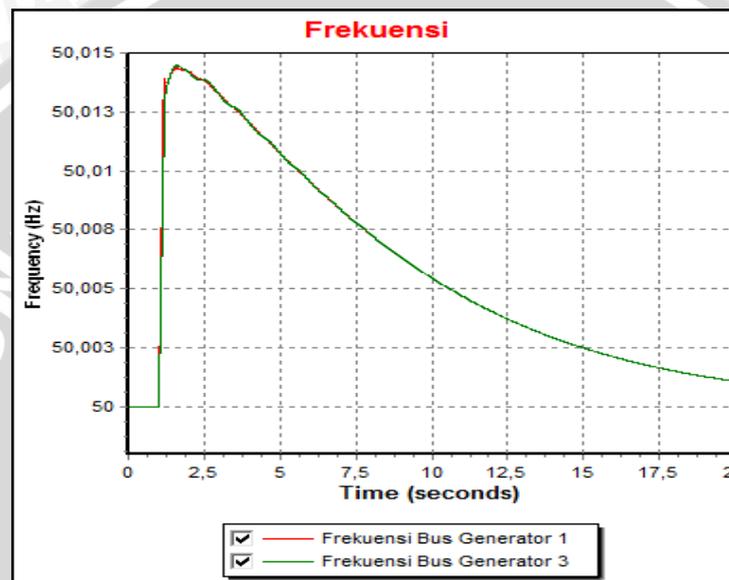
Sumber : Hasil Simulasi

Tabel 4.24 Simulasi stabilitas tegangan pada skenario 2c

Bus	$V_{\text{awal}} (\text{p.u.})$	$V_{\text{drop}} (\text{p.u.})$	$t_{\text{drop}} (\text{milidetik})$
Generator 1	1	0,0468	150
Generator 3	1	0,0434	150

Sumber : Hasil Simulasi

Pada hasil simulasi tersebut menunjukkan tegangan pada bus generator 1 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 1 p.u., kemudian tegangan menurun hingga mencapai 0,0468 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Tegangan kembali mencapai operasi normal setelah mengalami penurunan. Sedangkan tegangan pada bus generator 3 sebelum terjadi gangguan adalah sebesar 1 p.u. kemudian tegangan menurun hingga 0,0434 p.u. saat terjadi gangguan pada detik ke-1. Kedua grafik tegangan mengalami penurunan selama 150 milidetik sehingga tegangan sistem masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.28 Grafik frekuensi pada bus generator 1 dan generator 3 saat gangguan skenario 2c

Sumber : Hasil Simulasi

Berdasarkan Gambar 4.28 tersebut, frekuensi generator 1 dan generator 3 meningkat sebesar 0,0145 Hz ketika mengalami gangguan tiga fasa pada bus utama. Saat gangguan, frekuensi tidak melebihi batas yang ditentukan yaitu tidak lebih dari 52 Hz dan tidak kurang dari 47,5 Hz (Permen ESDM: 2007).

4.11 Perbandingan Stabilitas Sistem

Berdasarkan hasil simulasi mengenai stabilitas tegangan di PT. Kebon Agung Malang pada kondisi sebelum penambahan kapasitas pembangkit, setelah penambahan kapasitas pembangkit dan setelah penambahan kapasitas pembangkit sekaligus beban dapat diperoleh gambaran secara umum tentang stabilitas sudut rotor dan tegangan pada perusahaan tersebut melalui tabel berikut:

Tabel 4.25 Perbandingan stabilitas sudut rotor dalam berbagai kondisi

Letak Gangguan (Bus)	Bus	Kondisi 1		Kondisi 2		Kondisi 3	
		δ (°)	$t_{\text{pemulihan}}$ (detik)	δ (°)	$t_{\text{pemulihan}}$ (detik)	δ (°)	$t_{\text{pemulihan}}$ (detik)
MCC 8	Gen 1	11,5727	17,6	2,0849	12,4	3,6751	12,71
	Gen 2	-11,5727	17,6				
	Gen 3			-2,0849	12,4	-3,6751	12,71
Generator 2	Gen 1	11,5727	21,69				
	Gen 2	-11,5727	21,69				
Utama	Gen 1			2,0849	12,53	3,6751	13,73
	Gen 3			-2,0849	12,53	-3,6751	13,73

Tabel 4.26 Perbandingan stabilitas tegangan dalam berbagai kondisi

Letak Gangguan (Bus)	Bus	Kondisi 1		Kondisi 2		Kondisi 3	
		V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (detik)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (detik)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (detik)
MCC 8	Gen 1	0,1865	0,15	0,1837	0,15	0,1871	0,15
	Gen 2	0,1522	0,15				
	Gen 3			0,1851	0,15	0,1895	0,15
Generator 2	Gen 1	0,0602	0,15				
	Gen 2	$3,6 \times 10^{-9}$	0,15				
Utama	Gen 1			0,0443	0,15	0,0468	0,15
	Gen 3			0,0425	0,15	0,0434	0,15

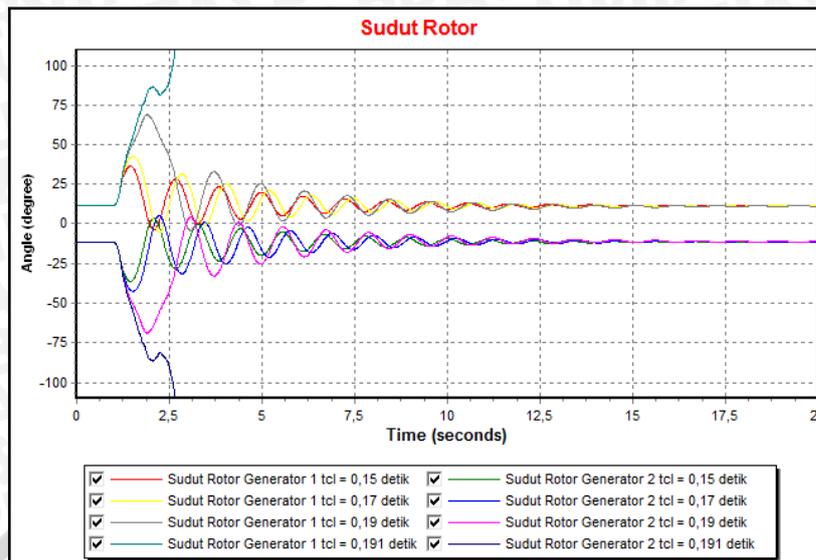
4.12 Waktu Pemutusan Kritis

Untuk dapat mengetahui waktu pemutusan kritis pada sistem daya sebelum dan setelah penambahan kapasitas generator di PT. Kebon Agung Malang, dapat dilakukan melalui cara *trial and error* dengan mengubah-ubah nilai waktu gangguan. Dalam hal ini dilakukan simulasi stabilitas dengan durasi gangguan 0,15 detik; waktu yang mendekati gangguan dan waktu gangguan ketika sudut rotor generator mengalami lepas sinkron.

4.12.1 Kondisi 1

Gambar 4.29 menunjukkan sudut rotor generator PT. Kebon Agung Malang saat sebelum penambahan kapasitas generator dengan 4 macam waktu gangguan. Dari hasil simulasi dapat diperoleh kondisi sudut rotor generator pada generator PT. Kebon Agung Malang dengan waktu gangguan selama 0,15 detik ; 0,17 detik ; 0,19 detik dan 0,191 detik.

Gambar 4.29 terlihat bahwa generator 1 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 0,191 detik. Sama dengan generator 1, generator 2 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 0,191 detik.

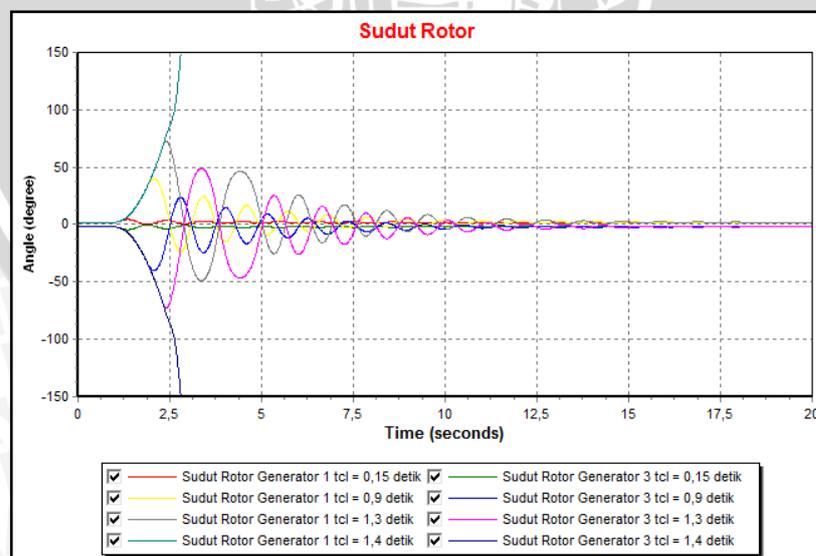


Gambar 4.29 Grafik Sudut Rotor pada bus generator 1 dan generator 2 saat kondisi 1
Sumber : Hasil Simulasi

4.12.2 Kondisi 2

Gambar 4.30 menunjukkan sudut rotor generator PT. Kebon Agung Malang saat setelah penambahan kapasitas generator dengan 4 macam waktu gangguan. Dari hasil simulasi dapat diperoleh kondisi sudut rotor generator pada generator PT. Kebon Agung Malang dengan waktu gangguan selama 0,150 detik ; 0,9 detik ; 1,3 detik dan 1,4 detik.

Gambar 4.30 terlihat bahwa generator 1 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 1,4 detik. Sama dengan generator 1, generator 3 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 1,4 detik.

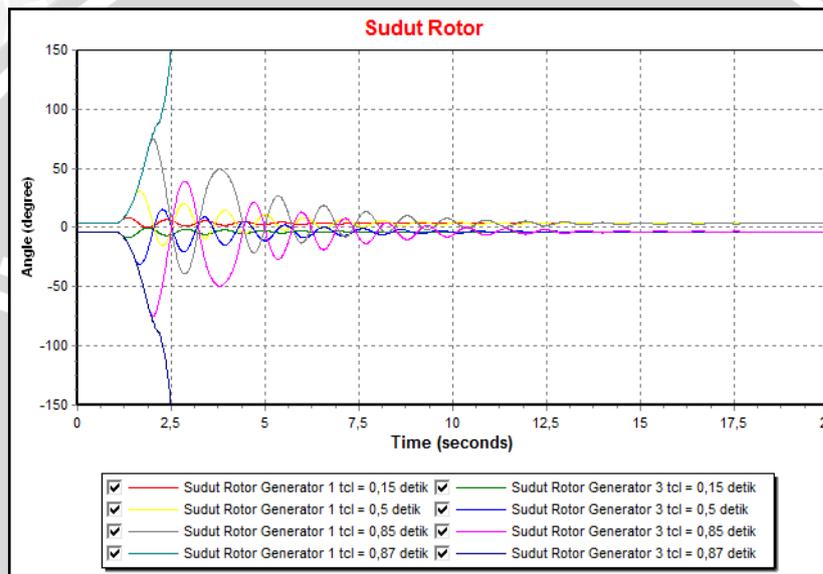


Gambar 4.30 Grafik Sudut Rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat kondisi 2
Sumber : Hasil Simulasi

4.12.3 Kondisi 3

Gambar 4.31 menunjukkan sudut rotor generator PT. Kebon Agung Malang saat setelah penambahan kapasitas generator dan beban dengan 4 macam waktu gangguan. Dari hasil simulasi dapat diperoleh kondisi sudut rotor generator pada generator PT. Kebon Agung Malang dengan waktu gangguan selama 0,15 detik ; 0,5 detik ; 0,85 detik dan 0,87 detik.

Gambar 4.31 terlihat bahwa generator 1 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 0,87 detik. Sama dengan generator 1, generator 3 mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 0,87 detik.



Gambar 4.31 Grafik Sudut Rotor pada bus generator 1 dan generator 3 saat kondisi 3

Sumber : Hasil Simulasi

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi dan analisis pada pembahasan sebelumnya, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kondisi sistem PT. Kebon Agung Malang sebelum penambahan kapasitas generator, menunjukkan sistem masih dalam kondisi stabil. Hal tersebut terlihat dari sudut rotor, dan tegangan yang dapat kembali ke kondisi normal. Frekuensi juga masih dalam batas toleransi setelah terjadi gangguan selama 0,15 detik.
2. Kondisi sistem PT. Kebon Agung Malang setelah penambahan kapasitas generator masih dalam kondisi stabil. Sudut rotor berosilasi namun dapat kembali ke kondisi normal saat gangguan dihilangkan. Jatuh tegangan pada kondisi ini masih dalam kriteria kestabilan dan frekuensi juga masih dalam batas toleransi yang diperbolehkan.
3. Waktu pemutusan kritis generator pada sistem PT. Kebon Agung Malang setelah penambahan kapasitas generator lebih lama dibandingkan dengan sistem sebelum penambahan kapasitas generator. Pada saat sebelum penambahan kapasitas generator, waktu pemutusan kritis generator adalah 0,19 detik. Sedangkan pada kondisi setelah penambahan kapasitas generator, waktu pemutusan kritis generator adalah 1,3 detik.

5.2 Saran

Dengan diketahuinya stabilitas sistem PT. Kebon Agung Malang pada kondisi setelah penambahan kapasitas generator pembangkit, maka perlu dilakukan sebuah analisis dan pembahasan mengenai rele pengaman. Sehingga ketika generator baru terpasang dan terjadi gangguan, maka kegagalan sistem ketika terjadi gangguan dapat diminimalisir.

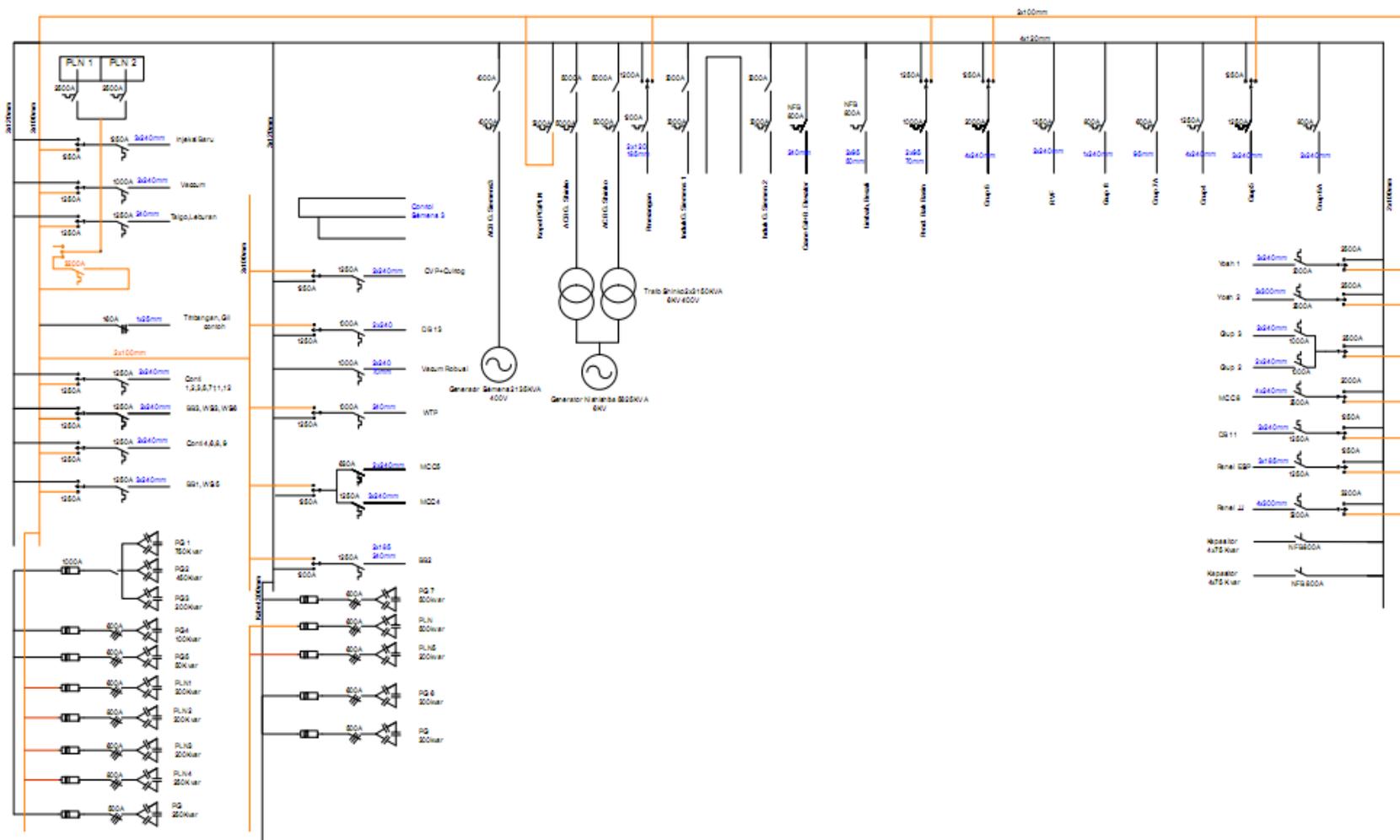
DAFTAR PUSTAKA

- Arrillaga, J. & Arnold, C. P. 1990. *Computer Analysis of Power Systems*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Grainger, John J. & Stevenson, William D. 1994. *Power System Analysis*. Singapore: Mcgraw-Hill.
- Grigsby, Leonard L. 2007. *Power System Stability and Control*. New York: Taylor & Francis Group, LLC.
- IEEE-CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions (Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., and Vittal, V.). 2004. *Definition and Classification of Power System Stability*. IEEE Transactions on Power Systems.
- Kundur, P. 1994. *Power Sistem Stability and Control*. New York : McGraw-Hill.
- Machowski, Jan., Bialek, Janusz W., & Bumby, James R. 2008. *Power System Dynamics Stability and Control*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. 2007. *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3 Tahun 2007 : Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali*. Jakarta : Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Mohamad, Arfah Marini, dkk. 2011. *Transient Stability Analysis on Sarawak's Grid using Power System Simulator for Engineering (PSS/E)*. IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA2011).
- Natarajan, Ramasamy. 2002. *Computer-Aided Power System Analysis*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Robert, H. Miller & James, H. Malinowski. 1994. *Power System Operation*. New York : McGraw-Hill.
- Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Stevenson, William D. 1990. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.



LAMPIRAN

Lampiran 1 Diagram Segaris PT. Kebon Agung Malang



Lampiran 2 Data Generator dan Transformator PT. Kebon Agung Malang

1. Data Generator

Parameter	Generator 1 & 3	Siemens 3	Satuan
S	5625	2135	kVA
P	4500	1708	kW
V	6000	400	V
I	542	3080	A
n	1500	1500	Rpm
f	50	50	Hz
Pf	0,8	0,75	Lagging
Phase	3	3	Phase
Poles	4	4	Poles

Sumber : PT. Kebon Agung Malang

2. Data Transformator

Phase		3	Phases
Frequency		50	Hz
Rated Power		3150	kVA
Rated Voltage	HV	6000	V
	LV	400	V
Current	HV	303,11	A
	LV	4546,63	A
Impedance		7,5	%
Type of cooling		ONAN	
Serial No.		06232507	

Sumber : PT. Kebon Agung Malang

Lampiran 3 Check List Panel Listrik

Hari Giling : 199

No	PEMAKAIAN TENAGA	S M	POWER	Waktu										KET.
				06.00	07.00	08.00	09.00	10.00	11.00	12.00	13.00			
				ACB	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00		
				Amp	22.00	23.00	24.00	01.00	02.00	03.00	04.00	05.00		
A ST. LISTRIK														
1	PENERANGAN		1250	500	310	310	310	310	310	310	310	310	310	
2	LIMBAH +BASE IN+TETES	PIV	1000	500	600	510	510	510	510	510	510	510	510	
3	TIMBANGAN+GIL CONTOH		200	50	80	70	70	70	70	70	70	70	70	
4	BESAU		400	70	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
5	PENDINGIN TURBIN		800	50	80	70	70	70	70	70	70	70	70	
B ST. KETEL														
1	YOSH 1		2000	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
2	YOSH 2		2500	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
3	JIANG XI		3200	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
4	MCC 6 A		800	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
5	WTP		1250	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
6	RECLAIMER		600	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
7	ESP		1250											
C ST. GILINGAN														
1	MCC 4		1250	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
2	MCC 5		600	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
3	CRANE		800	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
D ST. TENGAH														
1	DB. 13		1000											
2	CULTRON + CVP		1250	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
3	VACUM ROBUSHI		1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
4	GRUP 6		2000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
5	RVF		1250	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
6	SINGLE TRAY BARU		600	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
7	GRUP 4		1250	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
8	GRUP 5		1250	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
9	MCC 8		2500	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	
10	DB 11		1250	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
11	SINGLE TRAY		1000	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
12	INJEXI BARU		1250	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900	
E ST. PUTERAN														
1	BROAD BENT I (BB I)	PIV	1250	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
2	GRUP 2	PIV	1000	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	
3	GRUP 3	PIV	1000	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
4	DB 12 (BB II+WVS IV)		1250											
5	GRUP 1 (CONTI 1,2 & 3)	PIV	1250	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	
6	GRUP X (BB III DISCONTI 6)	PIV	1250	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
7	GRUP IX (CONTI 12,12&14)	PIV	1250	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	
* PANEL INDUK														
A	PLN - TRAVO I		2500	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	
	- TRAVO II		2500	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	
TOTAL . A													2800 A	
B GENERATOR PG														
1	- SHINKO TRAVO I		5000	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	
	- SHINKO TRAVO II		5000	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	3100	
TOTAL . B													12200 KW	
2	- SIEMENS 1		3000											
	- SIEMENS 2		3000											
	- SIEMENS 3		3200	700	700	700	700	700	700	700	700	700	700	1000 KW
OPERATOR:JAGA				PARAF	MANDOR	MASINIS	MASINIS							
Eko Mulyanto				PAGI	SHIFT	JAGA	PIKET							
				SIANG										
				MALAM										

Sumber : PT. Kebon Agung Malang



Lampiran 4 Panjang dan Impedansi Saluran

Dari Bus	Ke Bus	A (mm ²)	Panjang (m)	R (p.u.)	X (p.u.)
Generator 2 / Utama	INJEKSI BR	240	180	0,05655	0,06123
	TIMB. GIL	25	90	0,81788	0,12223
	CVP CULTROG	240	120	0,05655	0,06123
	DB 13	240	180	0,08483	0,09185
	VACUM ROBUSI	240	120	0,05655	0,06123
	WTP	240	70	0,03299	0,03572
	MCC5	240	90	0,04241	0,04592
	MCC 4	240	90	0,02828	0,03062
	BB 1	240	90	0,02828	0,03062
	PENERANGAN	120	10	0,00956	0,00555
	CRANE GIL.	240	80	0,0377	0,04082
	BESALI	95	90	0,10856	0,0514
	BAK BASIN	240	70	0,03299	0,01036
	GRUP 6	240	180	0,05655	0,06123
	MCC 6A	240	65	0,03063	0,03317
	GRUP 5	240	160	0,05027	0,05443
	GRUP 4	240	150	0,03534	0,03827
	DB 12	240	90	0,04241	0,04592
	PEND. TURBIN	95	10	0,01206	0,00571
	DOOR BR	240	150	0,07069	0,07654
	GRUP 10	240	90	0,04241	0,04592
	GRUP 9	240	90	0,04241	0,04592
	MCC 9	240	90	0,04241	0,04592
	DOOR LAMA	240	150	0,07069	0,07654
	YOSH 1	240	65	0,02042	0,02211
	YOSH 2	300	65	0,01628	0,0216
	MCC 8	240	180	0,04241	0,04592
	DB 11	240	120	0,05655	0,06123
	ESP	185	65	0,02684	0,02288
	JIANGXI JL	300	65	0,01221	0,0162
	GRUP 1	240	90	0,04241	0,04592
	GRUP 2	240	90	0,04241	0,04592
	GRUP 3	240	90	0,04241	0,04592
LIMBAH	95	20	0,04241	0,04592	

Sumber : PT. Kebon Agung Malang

Lampiran 5 Data Beban

Beban	P (MW)	Q (Mvar)
INJEKSI BR	0,204	0,1264
TIMB. GIL	0,017	0,0105
CVP CULTROG	0,204	0,1264
DB 13	0,204	0,1264
VACUM ROBUSI	0,2754	0,1707
WTP	0,068	0,0421
MCC5	0,068	0,0421
MCC 4	0,17	0,1054
BB 1	0,204	0,1264
PENERANGAN	0,1368	0,0663
CRANE GIL.	0,051	0,0316
BESALI	0,017	0,0105
BAK BASIN	0,1054	0,0653
GRUP 6	0,2754	0,1707
MCC 6A	0,17	0,1054
GRUP 5	0,204	0,1264
GRUP 4	0,323	0,2002
DB 12	0,068	0,0421
PEND. TURBIN	0,017	0,0105
DOOR BR	0,0374	0,0232
GRUP 10	0,102	0,0632
GRUP 9	0,1394	0,0864
MCC 9	0,102	0,0632
DOOR LAMA	0,1802	0,1117
YOSH 1	0,0374	0,0232
YOSH 2	0,034	0,0211
MCC 8	0,408	0,2529
DB 11	0,17	0,1054
ESP	0,0986	0,0611
JIANGXI JL	0,153	0,0948
GRUP 1	0,068	0,042143
GRUP 2	0,1054	0,065321
GRUP 3	0,034	0,021071

Sumber : PT. Kebon Agung Malang

Lampiran 6 Data Karakteristik Kabel

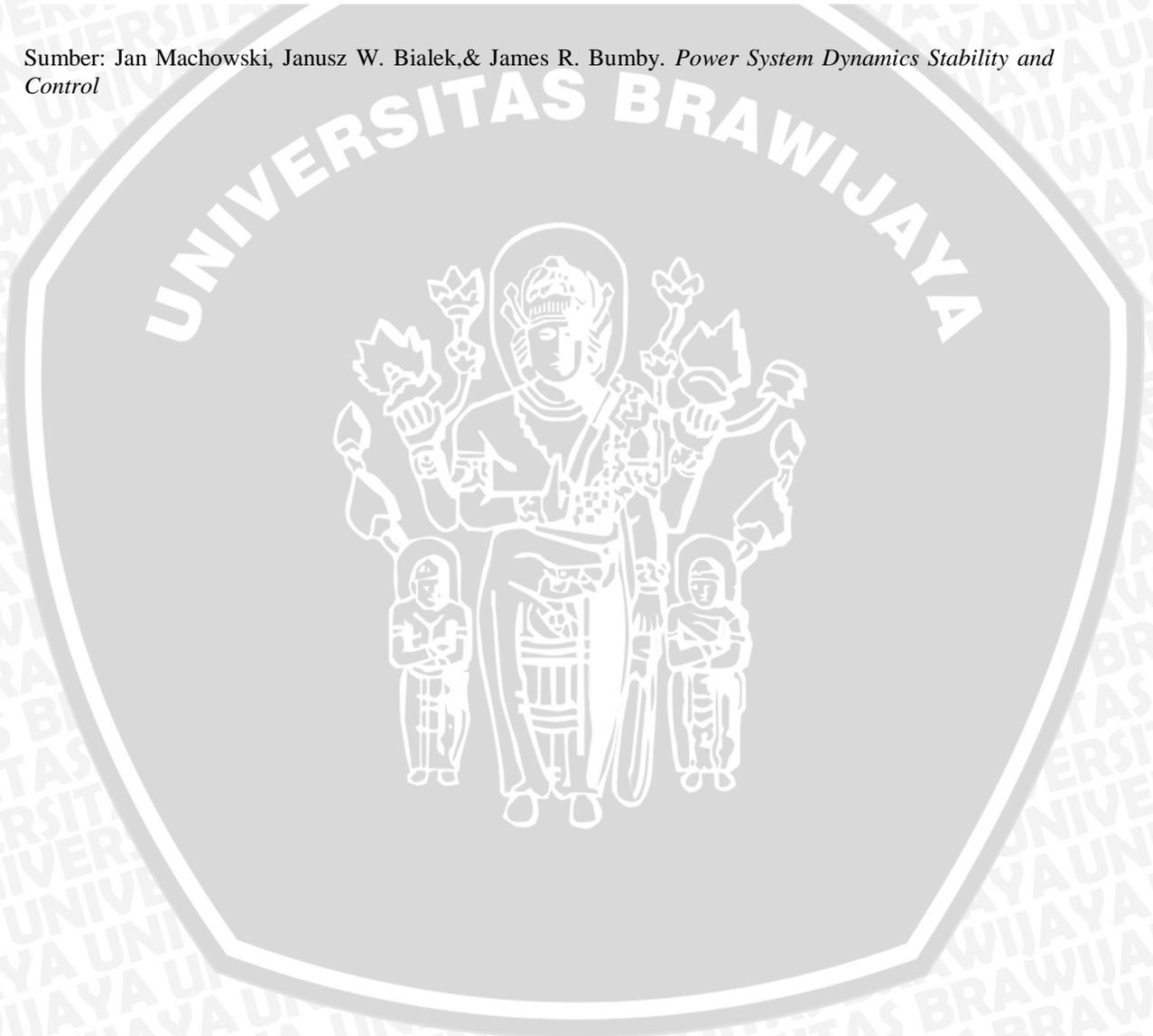
Luas Penampang (mm ²)		Resistansi Konduktor (ohm/km)		Induktansi (mH/km)		Arus Maksimum (A)	
Single core	Three core	Single core	Three core	Single core	Three core	Single core	Three core
25	25	0,727	0,727	0,43	0,346	191	135
35	35	0,524	0,524	0,408	0,331	231	175
50	50	0,268	0,387	0,39	0,319	277	208
70	70	0,193	0,268	0,367	0,303	345	259
95	95	0,153	0,193	0,349	0,291	418	316
120	120	0,193	0,153	0,337	0,283	481	363
150	150	0,124	0,124	0,331	0,277	537	414
185	185	0,0991	0,0991	0,318	0,269	612	474
240	240	0,0754	0,0754	0,306	0,26	716	558
300	300	0,0601	0,0601	0,296	0,254	811	634
400	400	0,047	0,047	0,288	0,248	901	766
500	-	0,0366	-	0,28	-	1006	-
630	-	0,0283	-	0,28	-	1088	-
800	-	0,0221	-	0,272	-	1210	-

Sumber : IEC 502-2dan IEC 60502

Lampiran 7 Data Dinamik Generator

Generator Data																			
Prime Mover	Model Name	MVA	Vintage	PF	Ra	T'do	T''do	T'qo	T''qo	H	D	Xd	Xq	X'd	X'q	X''d	XI	S(1.0)	S(1.2)
Fossil Steam	GENROU	<300	<1970	0.85	0.001	6	0.035	0.41	0.07	4	0	1.3	1.25	0.2	0.4	0.12	0.08	0.12	0.37
Fossil Steam	GENROU	<300	>1970	0.85	0.002	4.8	0.035	0.41	0.07	4	0	1.8	1.75	0.3	0.47	0.23	0.15	0.12	0.37
Fossil Steam	GENROU	>300	All	0.9	0.003	4.8	0.035	1.5	0.07	4	0	1.8	1.75	0.3	0.47	0.23	0.15	0.12	0.37
Nuclear	GENROU	All	All	0.9	0.003	6.8	0.035	0.41	0.07	3.5	0	1.9	1.75	0.29	0.44	0.22	0.15	0.12	0.37
Gas Turbine	GENROU	All	All	0.85	0.001	4.8	0.035	0.45	0.06	6	0	1.9	1.8	0.28	0.41	0.115	0.095	0.06	0.19
Combined Cycle Steam	GENROU	All	All	0.85	0.002	4.8	0.035	1.5	0.07	3.2	0	1.8	1.75	0.3	0.47	0.23	0.15	0.12	0.37
Combined Cycle Gas Turbine	GENROU	All	All	0.85	0.001	4.8	0.035	0.45	0.06	6	0	1.9	1.8	0.28	0.41	0.115	0.095	0.06	0.19
	Model Name	MVA		PF		T'do	T''do	T'qo	H	D	Xd	Xq	X'd	X'q	X''d	XI	S(1.0)	S(1.2)	
Hydro	GENSAL	All	All	0.85	0.003	6	0.04	0.06	4	0	1.05	0.7	0.28	0.18	0.14	0.11	0.5		
Diesel	GENSAL	All	All	0.85	0.003	5.5	0.04	0.06	1.5	0	1.4	0.8	0.35	0.25	0.16	0.1	0.4		

Sumber: Jan Machowski, Janusz W. Bialek, & James R. Bumby. *Power System Dynamics Stability and Control*



Lampiran 8 Reaktansi Saluran Kondisi 2

%Reaktansi saluran

x34=0.06123i;
 x35=0.1222245i;
 x36=0.06123i;
 x37=0.091845i;
 x38=0.06123i;
 x39=0.0357175i;
 x310=0.0459225i;
 x311=0.030615i;
 x312=0.030615i;

x313=0.005553875i;
 x314=0.04082i;
 x315=0.051397875i;
 x316=0.010358075i;
 x317=0.06123i;
 x318=0.03316625i;
 x319=0.05442666666666667i;
 x320=0.03826875i;

x321=0.0459225i;
 x322=0.005710875i;
 x323=0.0765375i;
 x324=0.0459225i;
 x325=0.0459225i;
 x326=0.0459225i;
 x327=0.0765375i;
 x328=0.02211083333333333i;
 x329=0.02160058333333333i;
 x330=0.0459225i;
 x331=0.06123i;
 x332=0.02287620833333333i;
 x333=0.0162004375i;



Lampiran 9 Listing Program Matlab Rangkaian Ekivalen Sebelum Gangguan

```

%Penjumlahan Beban dan Saluran (Sebelum Gangguan)
disp('Sebelum Gangguan');
perX1=1/(x34)+1/(x35)+1/(x36)+1/(x37)+1/(x38)+1/(x39)+1/(x310)+1/(x311)+1/(x312);
perX2=1/(x313)+1/(x314)+1/(x315)+1/(x316)+1/(x317)+1/(x318)+1/(x319)+1/(x320);
perX3=1/(x321)+1/(x322)+1/(x323)+1/(x324)+1/(x325)+1/(x326)+1/(x327)+1/(x328)+1/(x329)+1/(x330)+1/(x331)+1/(x332)+1/(x333);
perX=perX1+perX2+perX3;
Xbs=1/perX;

%Reaktansi Trafo
x12=0.0471i;
x13=0.0471i;
x23=0.0471i;
x24=0.0471i;

perxt1=1/x12+1/x13;
xt1=1/perxt1;
perxt2=1/x23+1/x24;
xt2=1/perxt2;

%Reaktansi Generator
x10=0;
x20=0;
%Reaktansi Generator+Trafo
xg1=x10+xt1;
xg2=x20+xt2;
%Reaktansi Paralel 2 Generator
perxg=1/xg1+1/xg2;
xg=1/perxg;

%Reaktansi Total
xtot=xg+Xbs

```



Lampiran 10 Listing Program Matlab Rangkaian Ekuivalen Saat Gangguan

```

%Penjumlahan Beban dan Saluran (Sebelum Gangguan)
disp('Saat Gangguan');
perX1=1/(x34)+1/(x35)+1/(x36)+1/(x37)+1/(x38)+1/(x39)+1/(x310)+1/(x311)+1/(x312);
perX2=1/(x313)+1/(x314)+1/(x315)+1/(x316)+1/(x317)+1/(x318)+1/(x319)+1/(x320);
perX3=1/(x321)+1/(x322)+1/(x323)+1/(x324)+1/(x325)+1/(x326)+1/(x327)+1/(x328)+1/(x329)+1/(x331)+1/(x332)+1/(x333);
perX=perX1+perX2+perX3;

disp('Reaktansi Beban Saat Gangguan');
Xbs=1/perX

%Reaktansi Trafo
x12=0.0471i;
x13=0.0471i;
x23=0.0471i;
x24=0.0471i;
perxt1=1/x12+1/x13;
xt1=1/perxt1;
perxt2=1/x23+1/x24;
xt2=1/perxt2;
%Reaktansi Generator
x10=0.14i;
x20=0.14i;
%Reaktansi Generator+Trafo
xg1=x10+xt1;
xg2=x20+xt2;
%Reaktansi Paralel 2 Generator
perxg=1/xg1+1/xg2;
xg=1/perxg

%Reaktansi Transformasi
xa0=(Xbs*x330)/(Xbs+x330+x330)
xb0=(Xbs*x330)/(Xbs+x330+x330)
xc0=(x330*x330)/(Xbs+x330+x330)

%Reaktansi Generator + xa0
xgb=xg+xa0;

%Impedansi ekuivalen saat gangguan
Xth=((xgb*xb0)+(xb0*xc0)+(xgb*xc0))/xc0

```

