

**ANALISIS KESTABILAN SISTEM DAYA PADA INTERKONEKSI
DUA GENERTOR SINKRON TIGA FASA PEMBANGKIT LISTRIK
TENAGA MIKROHIDRO DI DESA ANDUNGBIRU KECAMATAN
TIRIS KABUPATEN PROBOLINGGO**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :
JANUAR MUTTAQIN
NIM. 0610630053-63

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2013**

LEMBAR PERSETUJUAN

**ANALISIS KESTABILAN SISTEM DAYA PADA INTERKONEKSI DUA
GENERTOR SINKRON TIGA FASA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
MIKROHIDRO DI DESA ANDUNGBIRU KECAMATAN TIRIS KABUPATEN
PROBOLINGGO**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :
JANUAR MUTTAQIN
NIM. 0610630053-63

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Soemarwanto, MT.
NIP. 19500715 198003 1 002

Ir. Hery Purnomo, MT.
NIP. 19550708 198212 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KESTABILAN SISTEM DAYA PADA INTERKONEKSI DUA
GENERTOR SINKRON TIGA FASA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
MIKROHIDRO DI DESA ANDUNGBIRU KECAMATAN TIRIS KABUPATEN
PROBOLINGGO

SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI ELEKTRIK

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

JANUAR MUTTAQIN

NIM. 0610630053-63

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 2 Agustus 2013

Majelis Penguji :

Hadi Suyono, ST., MT., Ph.D.

NIP. 19730520 200801 1 013

Drs. Ir. Moch. Dhofir, MT.

NIP. 19600701 199002 1 001

Ir. Teguh Utomo, MT.

NIP. 19650913 199103 1 003

Mengetahui :

Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dr. Ir. Sholeh Hadi Pramono, MS.

NIP. 19580728 198701 1 001

PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan berkat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik yang berjudul "Analisis Kestabilan Sistem Daya Pada Interkoneksi Dua Generator Sinkron Tiga Fasa Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro Di Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo". Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

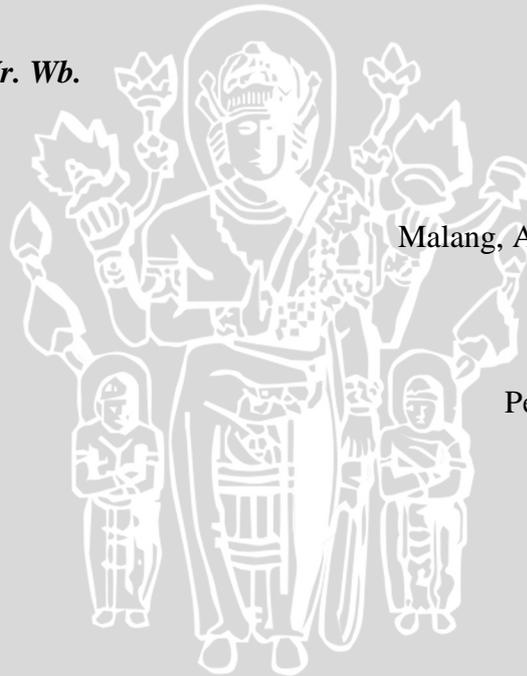
Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan, bimbingan serta dorongan dari semua pihak, penyelesaian skripsi ini tidak mungkin bisa terwujud. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr.Ir.Sholeh Hadi Pramono.,MS selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak M. Aziz Muslim, ST., MT., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Mochammad Rif'an, ST., MT. selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro.
4. Bapak Ir. Soemarwanto, MT. dan Bapak Ir. Hery Purnomo, MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan dan bimbingan dalam penyelesaian skripsi ini serta atas segala bentuk bantuan dan saran yang membangun.
5. Ayah dan ibu, kedua orang tua penulis, seluruh keluarga yang sudah memberi dorongan semangat, tenaga, biaya selama masa perkuliahan sampai saat ini kepada penulis serta atas segala bentuk dukungan moral dan panjatan doa yang tidak terputus.
6. Dwi Chasanawati dan keluarga, yang selalu memberikan dorongan semangat, masukan-masukan yang membangun serta doa yang dipanjatkan kepada penulis.
7. Dosen dan karyawan Teknik Elektro Universitas Brawijaya, khususnya ibu Dr. Rini Nur Hasanah, ST., M.Sc dan bapak Hadi Suyono, S.T., M.T., Ph.D. yang telah sangat banyak membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini serta keluarga besar mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya.

8. Rekan-rekan seperjuangan, seangkatan, khususnya Triyudha Yusticea Sulaksono, ST yang sangat membantu sekali dalam penyelesaian skripsi ini dan terus memberi dorongan semangat tanpa henti.
9. Semua pihak yang telah memberikan bantuan serta dukungan baik yang tidak dapat disebutkan satu persatu secara langsung maupun tidak langsung atas penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini belum sempurna, karena keterbatasan ilmu dan kendala-kendala lain yang terjadi selama pengerjaan skripsi ini. Oleh karena itu saran dan kritik mengenai penelitian ini diharapkan oleh penulis. Saran dan kritik ditujukan agar penelitian ini dapat menjadi karya tulis yang lebih baik dan lebih berguna. Semoga tulisan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut.

Wassalammualaikum Wr. Wb.



Malang, Agustus 2013

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
ABSTRAK	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 RUMUSAN MASALAH.....	2
1.3 BATASAN MASALAH.....	2
1.4 TUJUAN.....	2
1.5 SISTEMATIKA PEMBAHASAN	3
BAB II DASAR TEORI	4
2.1 PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO	4
2.2.1 Prinsip Kerja	4
2.2.2 Konversi Energi Listrik Tenaga Air	5
2.2 GENERATOR SINKRON	6
2.2.1 AVR (Automatic Voltage Regulator)	7
2.2.2 Interkoneksi Generator	8
2.3 ANALISIS ALIRAN DAYA	9
2.4 SISTEM PER UNIT	10
2.5 STABILITAS SISTEM DAYA	11
2.5.1 Stabilitas <i>Steady State</i>	11
2.5.2 Stabilitas <i>Transient</i>	12
2.5.3 Stabilitas Dinamis	12
2.6 DINAMIKA ROTOR DAN PERSAMAAN AYUNAN	13
2.6.1 Stabilitas Sudut Rotor	13
2.6.2 Persamaan Ayunan	14
2.6.3 Hubungan Sudut Daya	16
2.7 STABILITAS TEGANGAN	18
2.8 PERSAMAAN DALAM STUDI STABILITAS	20

2.8.1	Persamaan Keadaan Mantab (<i>Steady State</i>)	20
2.8.2	Persamaan Peralihan (<i>Transient</i>).....	21
2.8.3	Persamaan Sub-Peralihan (<i>Subtransient</i>).....	22
BAB III METODE PENELITIAN		24
3.1	STUDI LITERATUR	24
3.2	SURVEY LAPANGAN	24
3.3	PENGUMPULAN DATA	25
3.4	INTERKONEKSI GENERATOR SINKRON 3 FASA.....	25
3.5	PEMODELAN.....	25
3.6	SIMULASI.....	25
3.7	KESIMPULAN DAN SARAN	27
BAB IV SIMULASI DAN PEMBAHASAN HASIL		28
4.1	INTERKONEKSI 2 GENERATOR SINKRON 3 FASA.....	28
4.2	PEMODELAN SISTEM DAN PENGOLAHAN DATA	30
4.2.1	Pemodelan Sistem.....	30
4.2.2	Data Generator	32
4.2.3	Data Saluran.....	33
4.2.4	Data Beban.....	33
4.3	SIMULASI ALIRAN DAYA	34
4.3.1	Simulasi Aliran Daya PLTMH Andungbiru 1.....	34
4.3.2	Simulasi Aliran Daya PLTMH Andungbiru 2.....	34
4.3.3	Simulasi Aliran Daya Pada Sistem Interkoneksi	35
4.4	SIMULASI STABILITAS TEGANGAN DAN SUDUT ROTOR SEBELUM INTERKONEKSI	36
4.4.1	Simulasi Stabilitas Tegangan dan Sudur Rotor pada Sistem Daya PLTMH Andungbiru 1	36
4.4.2	Simulasi Stabilitas Tegangan dan Sudur Rotor pada Sistem Daya PLTMH Andungbiru 2	39
4.4.3	Simulasi Stabilitas Tegangan dan Sudur Rotor Setelah Interkoneksi	42
4.4.4	Perbandingan Stabilitas Tegangan Sebelum dan Setelah Interkoneksi	50
BAB V PENUTUP		52
5.1	KESIMPULAN.....	52

5.2 SARAN 52

DAFTAR PUSTAKA 53

LAMPIRAN 54



DAFTAR TABEL

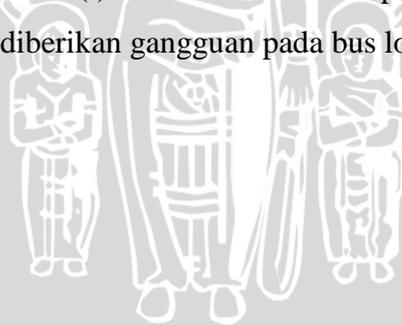
	Halaman
Tabel 4.1	Data parameter dinamik generator 32
Tabel 4.2	Data saluran 33
Tabel 4.3	Data pembebanan 2 PLTMH 33
Tabel 4.4	Data aliran daya PLTMH Andungbiru 1 34
Tabel 4.5	Data aliran daya PLTMH Andungbiru 2 35
Tabel 4.6	Data aliran daya pada sistem interkoneksi 35
Tabel 4.7	Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 3A 37
Tabel 4.8	Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 2A 38
Tabel 4.9	Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 1B 40
Tabel 4.10	Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 3B 41
Tabel 4.11	Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 3A setelah interkoneksi 43
Tabel 4.12	Simulasi stabilitas sudut rotor letak gangguan pada bus LOAD 3A setelah interkoneksi 44
Tabel 4.13	Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 2A setelah interkoneksi 45
Tabel 4.14	Simulasi stabilitas sudut rotor letak gangguan pada bus LOAD 2A setelah interkoneksi 46
Tabel 4.15	Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 1B setelah interkoneksi 47
Tabel 4.16	Simulasi stabilitas sudut rotor letak gangguan pada bus LOAD 1B setelah interkoneksi 48
Tabel 4.17	Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 3B setelah interkoneksi 49
Tabel 4.18	Simulasi stabilitas sudut rotor letak gangguan pada bus LOAD 3B setelah interkoneksi 50
Tabel 4.19	Perbandingan simulasi stabilitas tegangan pada sistem sebelum dan setelah interkoneksi untuk berbagai letak gangguan 50

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Diagram fasor generator yang terlalu diperkuat (<i>overexcited</i>)	7
Gambar 2.2 Diagram blok AVR	8
Gambar 2.3 Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan	14
Gambar 2.4 Model sistem sederhana (a) diagram segaris sistem, dan (b) rangkaian ekivalen sistem	17
Gambar 2.5 Hubungan sudut daya antara dua mesin sistem	17
Gambar 2.6 Jenis-jenis gangguan hubung singkat	19
Gambar 2.7 Diagram fasor mesin sinkron rotor silindris pada keadaan mantap	21
Gambar 2.8 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan peralihan	22
Gambar 2.9 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan sub-peralihan	23
Gambar 3.1 Kerangka umum Pengerjaan Metode Penelitian	24
Gambar 3.2 Diagram alir simulasi sebelum interkoneksi	26
Gambar 3.3 Diagram alir simulasi setelah interkoneksi	26
Gambar 4.1 Rangkaian interkoneksi Generator Sinkron 3 fasa	28
Gambar 4.2 Hubungan Lampu Terang-Gelap	29
Gambar 4.3 Diagram segaris sistem daya PLTMH Andungbiru 1	30
Gambar 4.4 Diagram segaris sistem daya PLTMH Andungbiru 2	31
Gambar 4.5 Diagram segaris sistem daya interkoneksi kedua PLTMH	31
Gambar 4.6 Grafik tegangan = $f(t)$ pada bus GEN AB1 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 3A	37
Gambar 4.7 Grafik sudut rotor = $f(t)$ pada bus GEN AB1 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 3A	37
Gambar 4.8 Grafik tegangan = $f(t)$ pada bus GEN AB1 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 2A	38
Gambar 4.9 Grafik sudut rotor = $f(t)$ pada bus GEN AB1 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 2A	39
Gambar 4.10 Grafik tegangan = $f(t)$ pada bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 1B	40
Gambar 4.11 Grafik sudut rotor = $f(t)$ pada bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 1B	40

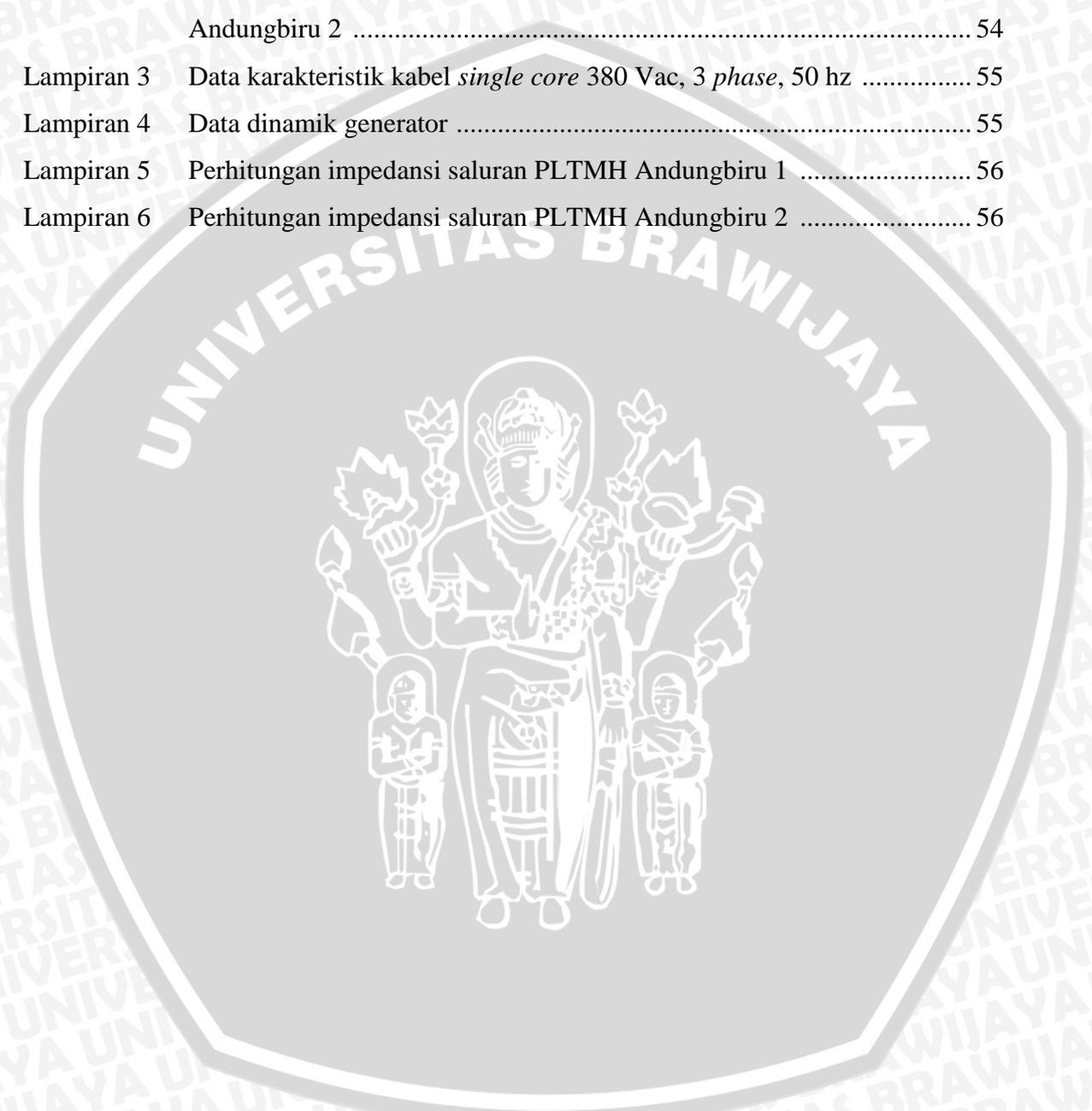


Gambar 4.12	Grafik tegangan = $f(t)$ pada bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 3B	41
Gambar 4.13	Grafik sudut rotor = $f(t)$ pada bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 3B	42
Gambar 4.14	Grafik tegangan = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 3A	43
Gambar 4.15	Grafik sudut rotor = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 3A	44
Gambar 4.16	Grafik tegangan = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 2A	45
Gambar 4.17	Grafik sudut rotor = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 2A	46
Gambar 4.18	Grafik tegangan = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 1B	47
Gambar 4.19	Grafik sudut rotor = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 1B	48
Gambar 4.20	Grafik tegangan = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 3B	49
Gambar 4.21	Grafik sudut rotor = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 3B	50



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1	1. Data generator di PLTMH Andungbiru 1 54
	2. Data generator di PLTMH Andungbiru 2 54
Lampiran 2	Data panjang saluran pada PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2 54
Lampiran 3	Data karakteristik kabel <i>single core</i> 380 Vac, 3 phase, 50 hz 55
Lampiran 4	Data dinamik generator 55
Lampiran 5	Perhitungan impedansi saluran PLTMH Andungbiru 1 56
Lampiran 6	Perhitungan impedansi saluran PLTMH Andungbiru 2 56



ABSTRAK

Januar Muttaqin, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Agustus 2013, *Analisis Kestabilan Sistem Daya Pada Interkoneksi dua Generator Sinkron Tiga Fasa Pembangkit Listrik tenaga Mikrohidro Di Desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo*, Dosen Pembimbing : Ir. Soemarwanto, MT. dan Ir. Hery Purnomo, MT.

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) banyak diterapkan di desa-desa dataran tinggi atau pegunungan yang masih memiliki sumber air alami yang cukup berlimpah. Hal tersebut sangat menguntungkan karena PLTMH dapat menjadi solusi untuk listrik pedesaan terutama di dataran tinggi dan pegunungan yang umumnya sulit dijangkau oleh saluran listrik PLN.

Pada bulan Januari tahun 2012, PT. PGN (Perusahaan Gas Negara) Tbk dan BPP Fakultas Teknik Universitas Brawijaya mendirikan PLTMH baru (PLTMH Andungbiru 2) di desa Andungbiru yang diletakkan sejajar dan disamping PLTMH lama (PLTMH Andungbiru 1) dengan kemampuan pembangkitan daya sebesar 16 kVA. Sehingga desa Andungbiru memiliki 2 PLTMH yaitu PLTMH Andungbiru 1 yang berdaya 40 kVA dan PLTMH Andungbiru 2 yang berdaya 16 kVA. PLTMH tersebut ditujukan untuk memenuhi kebutuhan akan energi listrik di desa Andungbiru yang terus bertambah. Namun kedua PLTMH tersebut masih belum diinterkoneksi sehingga untuk lebih menjamin kontinuitas aliran listrik ke rumah-rumah warga dilakukan interkoneksi terhadap kedua PLTMH. Suatu gangguan dalam sistem tenaga listrik dapat memicu ketidakstabilan sistem sehingga perlu dilakukan analisis terhadap kestabilan pada sistem daya.

Penelitian ini akan menganalisis stabilitas sistem daya pada saat kondisi awal sistem, yaitu ketika sistem daya kedua PLTMH belum diinterkoneksi dan kondisi ketika sistem daya kedua PLTMH telah diinterkoneksi. Hasil analisis akan menunjukkan kondisi tegangan dan sudut rotor sistem sebelum, selama dan setelah gangguan terjadi.

Hasil analisis kestabilan pada sistem menunjukkan jika tegangan dan sudut rotor dapat kembali ke operasi normal setelah sistem mengalami gangguan. *Drop* tegangan pada saat interkoneksi lebih besar daripada sebelum interkoneksi, namun demikian sistem daya masih dalam keadaan stabil karena masih bisa kembali ke operasi normalnya.

Kata kunci : PLTMH, interkoneksi, kestabilan, tegangan, sudut rotor

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Negara Indonesia merupakan salah satu negara berkembang dengan kebutuhan energi yang sangat tinggi. Hal ini kurang didukung dengan kurangnya pemanfaatan sumber energi yang dimiliki. Bertambahnya kebutuhan energi yang terus meningkat turut memperparah masalah energi di negara ini mengingat ketergantungan akan sumber energi yang tidak terbarukan masih sangat tinggi. Indonesia memiliki sumber kekayaan alam yang dapat digunakan sebagai sumber energi terbarukan. Salah satu contohnya adalah sumber energi air yang sangat melimpah. Sumber energi ini dapat digunakan dengan penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Menurut data departemen ESDM RI (Energi Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia), potensi tenaga air tersebar di seluruh Indonesia diperkirakan mencapai 75.000 MW, sementara pemanfaatannya baru sekitar 13,5% dari potensi yang ada (ESDM, 2003).

PLTMH banyak diterapkan di desa-desa dataran tinggi atau pegunungan yang masih memiliki sumber air alami yang cukup berlimpah. Hal tersebut sangat menguntungkan karena PLTMH dapat menjadi solusi untuk listrik pedesaan terutama di dataran tinggi dan pegunungan yang umumnya sulit dijangkau oleh saluran listrik PLN.

Pada bulan Januari tahun 2012, PT. PGN (Perusahaan Gas Negara) Tbk dan BPP Fakultas Teknik Universitas Brawijaya mendirikan PLTMH baru (PLTMH Andungbiru 2) di desa Andungbiru yang diletakkan sejajar dan disamping PLTMH lama (PLTMH Andungbiru 1) dengan kemampuan pembangkitan daya sebesar 16 kVA. Sehingga desa Andungbiru memiliki 2 PLTMH yaitu PLTMH Andungbiru 1 yang berdaya 40 kVA dan PLTMH Andungbiru 2 yang berdaya 16 kVA. PLTMH tersebut ditujukan untuk memenuhi kebutuhan akan energi listrik di desa Andungbiru yang terus bertambah.

Kedua PLTMH tersebut masih bekerja secara terpisah, dengan kata lain kedua generator masih bekerja sendiri-sendiri dalam menyuplai beban ke rumah-rumah warga. Dengan harapan kontinuitas pendistribusian listrik PLTMH bisa lebih baik dan terjamin maka pada penelitian ini akan dicoba untuk menginterkoneksi generator yang telah ada dan menganalisis stabilitas sistem daya sebelum dan sesudah dinterkoneksi jika terjadi gangguan pada sistem yang sebisa mungkin disesuaikan dengan keadaan yang ada dilapangan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang akan diteliti pada skripsi ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana menginterkoneksi 2 generator sinkron 3 fasa sesuai dengan keadaan riil pada PLTMH desa Andungbiru kecamatan Tiris kabupaten Probolinggo.
2. Bagaimana stabilitas tegangan dan sudut rotor sistem daya pada PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2 saat terjadi gangguan sebelum diinterkoneksi.
3. Bagaimana stabilitas tegangan dan sudut rotor sistem daya pada PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2 saat terjadi gangguan sesudah diinterkoneksi.
4. Bagaimana perbandingan stabilitas tegangan sistem daya pada PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2 saat terjadi gangguan sebelum dan sesudah diinterkoneksi.

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang telah di uraikan di atas maka pembahasan di batasi pada :

1. Kedua generator yang akan diinterkoneksi adalah generator sinkron 3 fasa pada PLTMH desa Andungbiru kecamatan Tiris kabupaten Probolinggo yang berkapasitas 40 kVA dan 16 kVA sesuai yang tertera pada nameplate.
2. Peralatan interkoneksi kedua generator menggunakan sinkronoskop lampu hubungan terang-gelap.
3. Dalam analisis dan simulasi hanya melakukan gangguan pada salah satu bus.
4. Parameter yang dianalisis adalah sudut rotor dan tegangan pada bus generator.
5. Stabilitas yang dibahas adalah stabilitas sistem daya terhadap gangguan hubung singkat tiga fasa.
6. Desain dan simulasi stabilitas sistem daya kedua PLTMH dilakukan menggunakan perangkat lunak PSSE (*Power System Simulator for Engineering*).

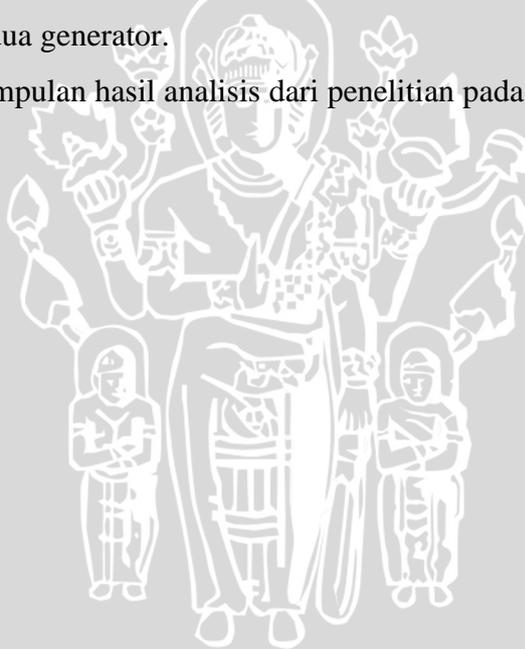
1.4 Tujuan

Tujuan dari pembahasan penelitian ini adalah menginterkoneksi dan menganalisis stabilitas sistem daya saat terjadi gangguan sebelum dan sesudah diinterkoneksi dari 2 generator sinkron 3 fasa pada PLTMH desa Andungbiru kecamatan Tiris kabupaten Probolinggo.

1.5 Sistematika Pembahasan

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

- BAB I** : berisi pendahuluan yang meliputi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, dan sistematika pembahasan.
- BAB II** : Berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan pada bab-bab selanjutnya dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.
- BAB III** : berisi metode penelitian yang akan dilakukan yang meliputi studi literatur, survey lapangan, pengumpulan data, interkoneksi kedua generator, simulasi dan analisis hasil simulasi rencana kerja paralel kedua generator menggunakan perangkat lunak PSSE simulasi.
- BAB IV** : berisi pembahasan dan analisis terhadap hasil simulasi perencanaan kerja paralel kedua generator.
- BAB V** : berisi kesimpulan hasil analisis dari penelitian pada skripsi ini serta saran



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai pembahasan teori dari referensi yang mendukung dalam penulisan skripsi ini.

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro

Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro adalah pembangkit listrik berukuran kecil yang memanfaatkan air sebagai tenaga penggerak turbin atau kincir air. Sumber tenaga berupa air dengan tinggi jatuh yang tidak terlalu tinggi. PLTMH merupakan bagian dari Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dimana energi air (potensial kinetik) sebagai sumber energi/daya dengan kapasitas daya terbangkitkan sampai dengan 500 kW. Sedangkan untuk pembangkitan listrik yang dapat menghasilkan energi listrik sampai sebesar 2 MW didefinisikan sebagai pembangkit listrik minihidro (Wibawa, 2001:43).

Air yang digunakan pada PLTMH dapat diperoleh dengan cara membendung ataupun dengan memindahkan aliran air yang telah ada untuk mendapatkan tinggi jatuh air yang cukup untuk membangkitkan daya listrik. Pada skripsi ini digunakan PLTMH dengan dua generator sinkron 3 fasa yang berkapasitas daya 40 kVA dan 16 kVA.

2.1.1 Prinsip Kerja

PLTMH pada prinsipnya memanfaatkan perbedaan ketinggian dan jumlah debit air per detik yang ada pada aliran air saluran irigasi, sungai atau air terjun. Aliran air ini akan memutar poros turbin/kincir air sehingga menghasilkan energi mekanik. Energi ini selanjutnya menggerakkan generator dan menghasilkan listrik.

PLTMH memiliki bendungan untuk mengatur aliran air yang akan dimanfaatkan sebagai tenaga penggerak PLTMH. Di dekat bendungan terdapat bangunan pengambilan air (*intake*). Kemudian terdapat pula saluran konduktor yang berfungsi mengalirkan air dari *intake*. Saluran ini dilengkapi dengan saluran pelimpah pada setiap jarak tertentu untuk mengeluarkan air yang berlebih.

Selain itu, PLTMH memiliki kolam penenang (*forebay*) untuk menenangkan air yang akan masuk ke turbin dan mengarahkannya masuk ke pipa pesat (*penstock*). Pipa pesat berfungsi mengalirkan air sebelum masuk ke turbin. Dalam pipa ini, energi potensial air di kolam penenang diubah menjadi energi kinetik yang akan memutar poros turbin / kincir air. Energi yang timbul akibat putaran poros tersebut kemudian disalurkan ke generator agar dapat diubah menjadi energi listrik.

Sistem transmisi daya poros pada generator dapat berupa sistem transmisi langsung (daya poros langsung dihubungkan dengan poros generator dengan bantuan kopling), atau sistem transmisi daya tidak langsung, yaitu menggunakan sabuk atau belt untuk memindahkan daya antara dua poros sejajar. Keuntungan sistem transmisi langsung adalah lebih kompak, mudah dirawat, dan efisiensinya lebih tinggi. *Gear box* dapat digunakan untuk mengoreksi rasio kecepatan putaran. Sistem transmisi tidak langsung memungkinkan adanya variasi dalam penggunaan generator secara lebih luas karena kecepatan putar poros generator tidak perlu sama dengan kecepatan putar poros turbin. Jenis sabuk yang biasa digunakan untuk PLTMH skala besar adalah jenis *flat belt*, sedang *V-belt* digunakan untuk skala di bawah 20 kW. Listrik yang dihasilkan oleh generator dapat langsung disalurkan lewat kabel pada tiang-tiang listrik menuju rumah konsumen (Reza, 2010:77).

2.1.2 Konversi Energi Listrik Tenaga air

Besarnya daya hidrolis (P_h) yang merupakan potensi sumber daya energi air pada suatu wilayah, ditentukan melalui persamaan : (Patty, 1995:97)

$$P_h = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h \text{ Watt} = 9,8 \cdot Q \cdot h \text{ (kW)} \quad (2.1)$$

dengan :

- P_h : daya hidrolis (kW)
- Q : debit air (m^3/s)
- ρ : massa jenis air (= 1000 kg/m^3)
- g : gravitasi bumi (= $9,8 \text{ m/s}^2$)
- h : tinggi jatuh air (m)

Ada beberapa hal yang sangat mempengaruhi daya keluaran dari sistem PLTMH, Selain besarnya debit air dan tinggi jatuh air, daya keluaran tergantung dari efisiensi peralatan yang dipakai, diantaranya pipa pesat, turbin, transmisi mekanik, dan generator yang dipakai. Jika efisiensi pipa pesat (η_{pp}) dan efisiensi turbin (η_{tb}) diketahui, maka besarnya daya mekanik turbin dapat ditentukan dari persamaan (Wibawa, 2001:57) :

$$P_{tb} = \eta_{tb} \cdot \eta_{pp} \cdot P_h \text{ (kW)} \quad (2.2)$$

Apabila antara turbin dengan generator terdapat perangkat sistem transmisi mekanik (η_{tm}), dan efisiensi generator (η_g) diketahui, dapatlah ditentukan besarnya daya keluaran elektrik dari generator, melalui persamaan (Wibawa, 2001:33) :

$$P_{out} = \eta_{tm} \cdot \eta_g \cdot P_{tb} \text{ (kW)} \quad (2.3)$$

atau :

$$P_{out} = \eta_{total} \cdot P_h \text{ (kW)} \quad (2.4)$$

sehingga :

$$P_{out} = \eta_{total} \cdot Q \cdot g \cdot h \text{ (kW)} \quad (2.5)$$

Dalam hal ini, η_{total} adalah efisiensi total sistem mulai dari turbin sampai dengan generator ($\eta_{total} = \eta_{pp} \cdot \eta_{tb} \cdot \eta_{tm} \cdot \eta_g$). Sedangkan $\eta_{pp} \cdot \eta_{tb}$ dikenal pula dengan istilah efisiensi mekanik (η_{mek}).

2.2 Generator Sinkron

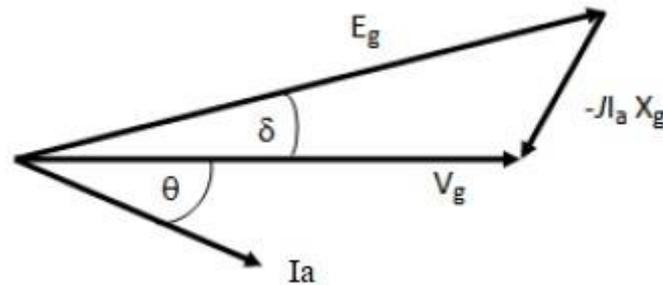
Generator sinkron diklasifikasikan sebagai generator berkecepatan tinggi dan digerakkan oleh uap atau turbin gas, atau generator berkecepatan rendah yang digerakkan oleh turbin air. Biasanya generator berkecepatan tinggi terdiri dari dua atau empat kutub sehingga di sistem 50 Hz generator akan digerakkan 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 yang dari mesin yang dipasang poros dan berputar di dalam stator yang kosong. Lilitan pada rotor dinamakan lilitan medan (*field winding*) dan dicatu dengan arus DC (Stevenson, 1996 : 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).

Pengubahan penguatan atau eksitasi mesin serempak adalah faktor yang penting dalam pengaturan aliran daya. Apabila sebuah generator yang terminalnya dihubungkan ke suatu sistem daya yang besar sehingga tegangan V_g pada terminal generator tersebut tidak akan berubah karena adanya perubahan eksitasi generator. Apabila masukan daya generator dipertahankan, maka suatu nilai E_g (ggl) generator dapat diubah-ubah dengan

merubah besar eksitasi medan DC. Maka untuk suatu nilai E_g , diagram fasor generator diperlihatkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2.1 Diagram fasor generator yang terlalu diperkuat (*overexcited*)

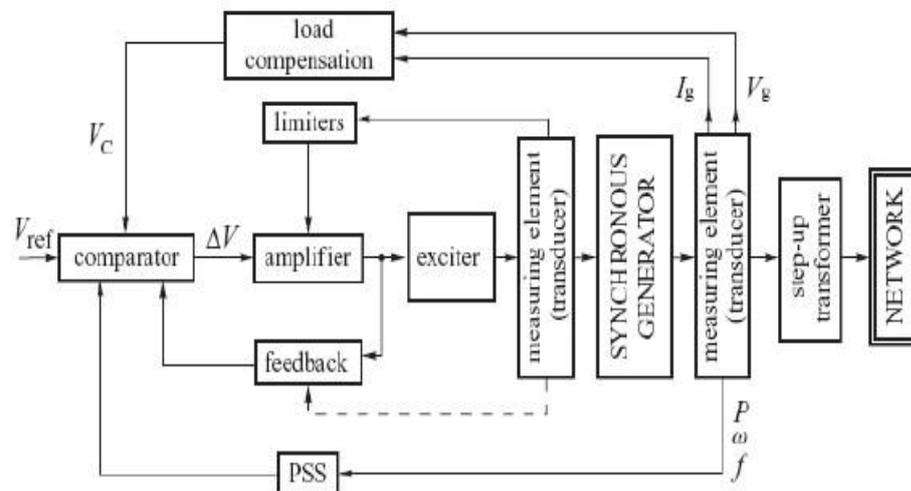
Sumber: Stevenson, 1996 : 130

Sudut δ dinamakan dengan sudut momen (*torque angle*) atau sudut daya (*power angle*) dari mesin itu. Generator yang terlalu diperkuat (*overexcited*) mencatu arus tertinggal ke sistem.

2.2.1 AVR (*Automatic Voltage Regulator*)

AVR (*Automatic Voltage Regulator*) berfungsi untuk menjaga agar tegangan generator tetap konstan dengan kata lain generator akan tetap mengeluarkan tegangan yang selalu stabil tidak terpengaruh pada perubahan beban yang selalu berubah-ubah, dikarenakan beban sangat mempengaruhi tegangan output generator.

Prinsip kerja dari AVR adalah mengatur arus penguatan (*excitacy*) pada exciter. Apabila tegangan output generator di bawah tegangan nominal tegangan generator, maka AVR akan memperbesar arus penguatan (*excitacy*) pada exciter. Dan juga sebaliknya apabila tegangan output Generator melebihi tegangan nominal generator maka AVR akan mengurangi arus penguatan (*excitacy*) pada exciter. Dengan demikian apabila terjadi perubahan tegangan output Generator akan dapat distabilkan oleh AVR secara otomatis dikarenakan dilengkapi dengan peralatan seperti alat yang digunakan untuk pembatasan penguat minimum ataupun maximum yang bekerja secara otomatis.



Gambar 2.2 Diagram blok AVR

Sumber : Jan Machowski, 2008 : 13

2.2.2 Interkoneksi Generator

Operasi interkoneksi pusat-pusat tenaga listrik pada dasarnya merupakan perluasan interkoneksi satu generator dengan generator lain dengan tambahan resistansi dan reaktansi saluran-saluran interkoneksi yang biasa disebut sinkronisasi. Adapun tujuan dari operasi interkoneksi generator antara lain :

1. Mendapatkan daya yang lebih besar.
2. Berfungsi sebagai daya cadangan tambahan untuk permintaan beban yang suatu ketika bertambah.
3. Untuk pemadaman satu mesin dan penyalaan mesin standby tanpa adanya pemutusan aliran daya.
4. Untuk menjamin kontinuitas ketersediaan daya listrik.

Dalam melakukan sinkronisasi dua buah generator atau lebih Syarat-syarat yang harus dipenuhi ialah :

- Tegangan dari kedua Generator yang diparalelkan harus sama.
- Frekuensi dari kedua generator harus sama.
- Sudut fasa dari kedua generator harus sama.
- Urutan fasa dari kedua generator harus sama.

Jika syarat-syarat diatas tidak dipenuhi maka akan berakibat :

1. Pada generator yang diinterkoneksi dengan generator lain pada saat sama-sama belum berbeban, maka apabila tegangan lebih tinggi power factor akan rendah (induktif) namun sebaliknya *power factor* generator yang lain akan juga rendah

namun bersifat kapasitif, sehingga generator yang lain mempunyai kecenderungan *reverse power*.

2. Jika frekuensi tidak sama diparalelkan maka akan terjadi beberapa kemungkinan yaitu dari yang paling ringan sampai yang paling berat. Sebagai contoh generator 1 mempunyai frekuensi 49 Hz sedangkan generator 2 mempunyai frekuensi 50 Hz. Dengan melihat *synchronoscope* maka jarum akan berputar dengan kecepatan sudut 2π / detik atau 1 putaran/ detik. Jika pada saat masuk pas pada sudut nol maka generator yang memiliki frekuensi lebih rendah akan mengalami *reverse power* dimana pada saat terhubung sinkron frekuensi ada pada 49,5 Hz . Dan proteksi *reverse power* akan bekerja mengamankan, namun jika pada saat masuk sinkron pas posisi *synchronoscope* di sudut 180^0 itu berarti terjadi selisih tegangan yang sangat besar disamping kemungkinan *reverse* juga terjadi kerusakan yang fatal terhadap generator, di *breaker* akan muncul arus yang besar sehingga menimbulkan percikan api yang besar dan diengine akan terjadi hunting sesaat, hal itu bisa mengakibatkan kerusakan mekanis sampai patah pada cransaft. Karena tekanan beban besar yang tiba tiba.
3. Jika sudut fase tidak sama namun kecenderungan frekuensi sama hanya akan menyebabkan *hunting* sesaat tanpa ada kemungkinan *reverse power*, namun juga sangat berbahaya jika berbeda sudutnya terlalu besar, *engine* akan mengalami tekanan sesaat hingga hunting.
4. Jika urutan phase tidak sama system ABC di parallel dengan system CBA, maka akan terjadi selisih tegangan sebesar 2 kali tegangan nominal, hal itu bisa dideteksi dengan diukur secara manual menggunakan voltmeter, pada saat *synchronoscope* menunjuk 0^0 , terdapat selisih sebesar 2×400 V.

Mengacu pada syarat-syarat diatas, Metoda sederhana yang dipergunakan untuk mensinkronkan dua generator atau lebih adalah dengan mempergunakan sinkronoskop lampu. Yang harus diperhatikan dalam metoda sederhana ini adalah lampu-lampu indikator harus sanggup menahan dua kali tegangan antar fasa. Untuk hubungan sinkronoskop lampu sendiri ada beberapa hubungan, yaitu hubungan lampu terang, hubungan lampu gelap, hubungan lampu terang-gelap.

2.3 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 dan 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 . Umumnya dalam studi aliran daya hanya terdapat satu bus berayun.

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, 1996: 31).

Apabila pada tegangan dan daya yang digunakan adalah tegangan dan daya 3 fasa, maka perhitungan nilai dasar menggunakan rumus-rumus berikut (Stevenson, 1996: 31):

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar}, \frac{kV_{LL}}{\sqrt{3}})^2 \times 1000}{kVA_{3\phi} / 3 \text{ dasar}} \quad (2.6)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar}, kV_{LL})^2 \times 1000}{kVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2.7)$$

$$\text{Impedansi dasar} = \frac{(\text{tegangan dasar}, kV_{LL})^2}{MVA_{3\phi} \text{ dasar}} \quad (2.8)$$

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 (Prabha Kundur, 1994 : 17).

Kestabilan pada sistem tenaga listrik merupakan masalah yang sangat penting dalam penyediaan daya kepada konsumen. Biasanya masalah kestabilan yang sering terjadi adalah masalah beban lebih, berkurangnya pasokan daya reaktif sehingga akan mengakibatkan sistem berada pada kondisi *voltage collapse* dan akan terjadi kemungkinan terburuk yaitu terjadi *blackouts*.

Masalah kestabilan biasanya diklasifikasikan menjadi tiga tipe bergantung pada sifat dan besar gangguan, yaitu (Robert H.Miller & James H.Malinowski, 1994:213) :

1. Stabilitas *steady state*
2. Stabilitas *transient*
3. Stabilitas dinamis

2.5.1 Stabilitas *Steady State*

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 regulasi tegangan otomatis (AVR) pada generator (Robert H.Miller & James H.Malinowski, 1994:214).

2.5.2 Stabilitas *Transient*

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 transien 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).

Sebagaimana pada stabilitas *steady-state*, kecepatan respon pada sistem eksitasi generator merupakan faktor yang penting dalam mempertahankan stabilitas *transient*. Gangguan pada sistem biasanya diikuti oleh perubahan tegangan yang cepat pada sistem, dan pemulihan kembali tegangan dengan cepat menuju ke kondisi normal merupakan hal yang penting dalam mempertahankan kestabilan.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa stabilitas *transient* adalah kemampuan untuk tetap pada kondisi sinkron selama periode terjadinya gangguan dan sebelum adanya reaksi dari governor. Pada umumnya ayunan pertama pada rotor mesin akan terjadi selama satu detik setelah gangguan. Setelah periode ini, governor akan mulai bereaksi, biasanya sekitar 4 hingga 5 detik, dan stabilitas dinamis akan efektif.

2.5.3 Stabilitas Dinamis

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).

Selama periode ini, governor akan membuka atau menutup katup sesuai dengan yang diperlukan untuk meningkatkan atau menurunkan energi input pada prime mover dan operasi kontroler saluran untuk mengembalikan aliran daya pada saluran ke kondisi normal. Biasanya bila generator peka terhadap *drop* kecepatan, generator akan bereaksi untuk membuka katup dan memberikan uap lebih pada turbin uap atau air pada turbin

air serta memberikan cukup energi untuk menahan penurunan kecepatan (frekuensi) dan mempercepat sistem hingga kembali ke keadaan normal.

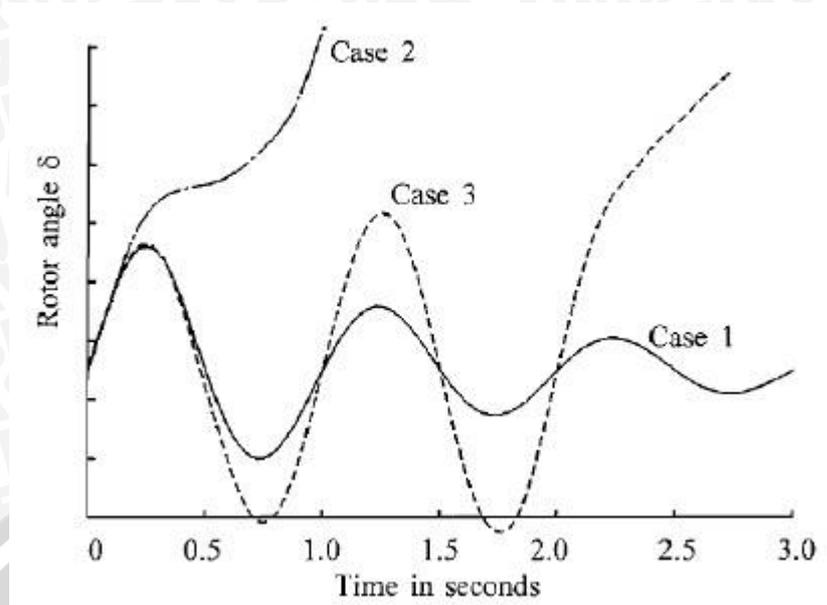
2.6 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

2.6.1 Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor merupakan kemampuan mesin sinkron yang saling terinterkoneksi pada sistem untuk tetap sinkron pada operasi normal dan setelah mengalami gangguan (Grigsby,2007). Mekanisme mesin sinkron yang saling terinterkoneksi antara satu mesin dengan mesin yang lain adalah melalui kekuatan memulihkan torsi yang bertindak setiap kali ada torsi yang cenderung mempercepat atau mengurangi kecepatan. Ketika dalam kondisi mantab, ada keseimbangan antara torsi input mekanis dan torsi keluaran listrik dari setiap mesin dan kecepatan konstan. Jika sistem ini terganggu, maka keseimbanganpun juga akan terganggu. Ketika mesin sinkron kehilangan sinkronisme dengan seluruh sistem, rotor akan berjalan pada kecepatan yang lebih tinggi atau lebih rendah dari yang dibutuhkan untuk menghasilkan tegangan pada frekuensi sistem sehingga sistem proteksi akan mengisolasi mesin dari dari sistem.

Untuk kemudahan dalam analisis dan untuk mendapatkan manfaat tentang sifat masalah stabilitas, biasanya fenomena stabilitas sudut rotor dikarakteristikkan menjadi dua kategori berikut : (Prabha Kundur, 1994: 23)

- a. Stabilitas sinyal kecil (atau gangguan kecil) adalah kemampuan dari sistem daya untuk menjaga sinkronisasi dalam gangguan kecil. Gangguan tersebut terjadi terus menerus pada sistem karena variasi kecil dalam beban.
- b. Stabilitas peralihan merupakan kemampuan dari sistem daya untuk menjaga sinkronisasi ketika terjadi gangguan peralihan. Stabilitas tergantung pada keadaan operasi awal dari sistem dan tingkat gangguan. Gambar 2.3 memperlihatkan perilaku mesin sinkron dalam keadaan stabil dan tidak stabil.



Gambar 2.3 Respon sudut rotor pada saat terjadi gangguan

Sumber : Prabha Kundur ,1994: 26

Gambar tersebut menunjukkan respon dari sudut rotor yang stabil dan untuk dua kasus tidak stabil. Dalam kasus yang stabil (*case 1*), sudut rotor meningkat hingga mencapai maksimum kemudian menurun dan beresilasi hingga mencapai kondisi mantab kembali. Dalam kasus 2 (*case 2*), sudut rotor terus meningkat hingga kehilangan sinkronisasi. Bentuk ketidakstabilan ini disebut sebagai ketidakstabilan ayunan pertama. Dalam kasus 3 (*case 3*), sistem stabil dalam ayunan pertama, tetapi menjadi tidak stabil akibat osilasi yang terus berkembang sehingga menyebabkan mesin kehilangan sinkronisasi. Bentuk ketidakstabilan ini biasanya adalah ketidakstabilan sinyal kecil dan tidak harus sebagai akibat dari gangguan peralihan.

2.6.2 Persamaan Ayunan

Dalam sebuah mesin sinkron, penggerak utama memberikan sebuah torsi mekanis T_m pada poros mesin dan mesin menghasilkan suatu torsi elektromagnetik T_e . Jika, sebagai akibat dari gangguan, torsi mekanis lebih besar daripada torsi elektromagnetik, sebuah torsi percepatan T_a adalah (Grigsby, 2007 : 8.2):

$$T_a = T_m - T_e \tag{2.9}$$

dengan :

T_a : torsi percepatan

T_m : torsi mekanis

T_e : torsi elektromagnetik

Dalam hal ini torsi lain yang disebabkan oleh gesekan, rugi-rugi inti, dan angin dalam mesin diabaikan. T_a memiliki efek mempercepat mesin, dengan inersia J (kg.m^2) yang terdiri dari inersia dari generator dan penggerak utama dan oleh karena itu Persamaan (2.9) dinyatakan sebagai : (Grigsby, 2007 : 8.2)

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (2.10)$$

dengan :

J : inersia mesin (kg.m^2)

t : waktu dalam detik

ω_m : kecepatan sudut mekanik rotor mesin dalam rad/s

Hal ini secara umum dapat menunjukkan persamaan inersia mesin yang konstan. Jika ω_{0m} adalah rentang kecepatan sudut mekanik dalam rad/s, J dapat ditulis sebagai berikut : (Grigsby, 2007:8.2)

$$J \frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{\text{dasar}} \quad (2.11)$$

dengan :

H : konstanta inersia mesin (MJ/MVA)

VA_{dasar} : daya dasar (MVA)

Sehingga,

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{\text{dasar}} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (2.12)$$

Dan sekarang, jika ω_r menunjukkan kecepatan sudut rotor (rad/s) dan nilai ω_0 pada rentangnya, persamaan dapat ditulis sebagai : (Grigsby, 2007 : 8.2)

$$2H \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \quad (2.13)$$

Akhirnya dapat ditunjukkan bahwa :

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d^2\delta}{\omega_0 dt^2} \quad (2.14)$$

di mana δ adalah posisi sudut dari rotor sehubungan dengan suatu putaran sinkron terhadap acuan.

Berdasarkan Persamaan (2.13) dan (2.14) akan diperoleh:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2.15)$$

Dengan mengingat bahwa daya adalah hasil kali momen putar dengan kecepatan sudutnya, sehingga diperoleh:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (2.16)$$

dan dapat diperoleh pula suatu persamaan dengan pertimbangan kecepatan sinkron ω_s :

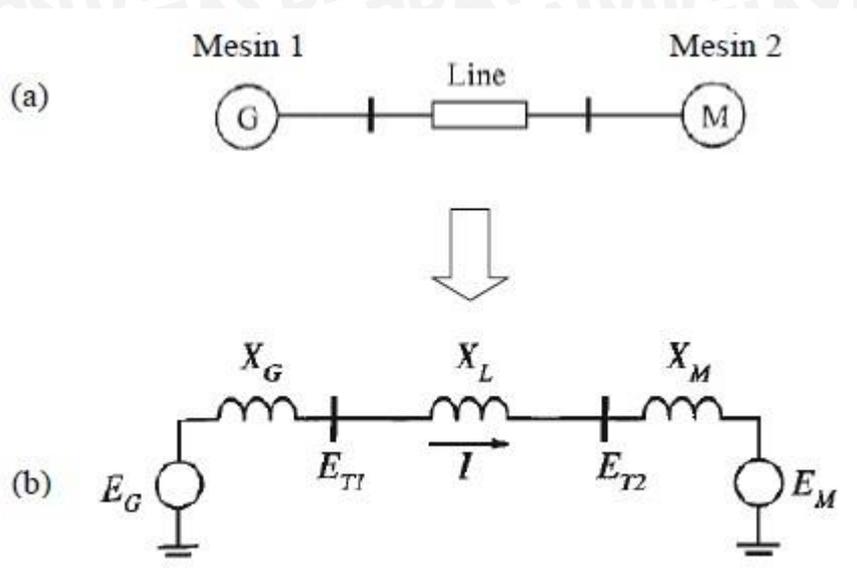
$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_s \quad (2.17)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.18)$$

Pada sistem yang stabil selama gangguan, sudut rotor (dijelaskan oleh persamaan ayunan) akan berosilasi di sekitar titik kesetimbangan. Ketika terjadi gangguan atau penambahan beban secara tiba-tiba dalam jumlah besar, maka daya keluar elektrik generator akan jauh melampaui daya masuk mekanis. Kekurangan ini akan disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Jadi generator akan berputar lebih lambat sehingga sudut daya generator bertambah besar dan daya masuk generator juga bertambah. Jika sudut rotor meningkat tanpa batas, mesin dikatakan tidak stabil selama mesin terus mempercepat dan tidak mencapai keadaan keseimbangan baru. Dalam sistem multimesin, mesin akan melepas sinkronisasi dengan mesin lainnya.

2.6.3 Hubungan Sudut Daya

Karakteristik penting yang memiliki pengaruh pada stabilitas sistem daya adalah hubungan antara perubahan daya dan posisi sudut dari rotor mesin sinkron. Hubungan ini merupakan hubungan nonlinier. Gambar 2.4(a) menunjukkan sebuah sistem sederhana, dimana dalam sistem ini terdapat 2 mesin sinkron yang terhubung melalui saluran transmisi. Diasumsikan jika mesin 1 direpresentasikan sebagai generator yang menyuplai daya ke sebuah motor yang direpresentasikan sebagai mesin 2. (Prabha Kundur, 1994: 20).



Gambar 2.4 Model sistem sederhana (a) diagram segaris sistem, dan (b) rangkaian ekivalen sistem
Sumber: Prabha Kundur ,1994: 21

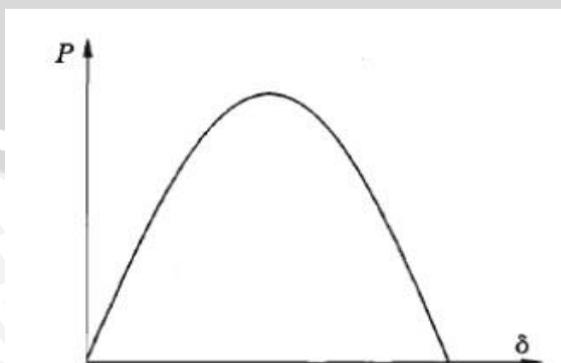
Gambar 2.4(b) menunjukkan rangkaian ekivalen sistem yang dapat digunakan dalam studi hubungan sudut daya. Besar daya yang disalurkan dari generator sesuai dengan persamaan (2.19).

$$P_e = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (2.19)$$

dimana :

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad (2.20)$$

Gambar 2.5 menunjukkan hubungan sudut daya. Dalam kurva tersebut terlihat jika 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.



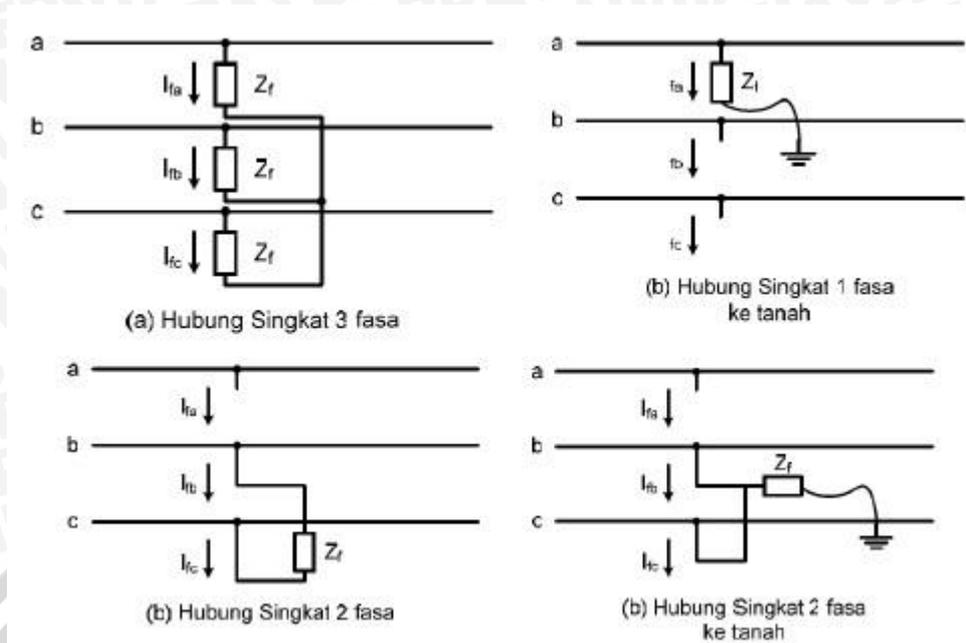
Gambar 2.5 Hubungan sudut daya antara dua mesin sistem
Sumber: Prabha Kundur ,1994: 26

2.7 Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan merupakan kemampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga tegangan tetap stabil di semua bus dalam suatu sistem pada saat kondisi operasi normal dan setelah terjadi suatu gangguan (Prabha Kundur, 1994: 27). Suatu sistem memasuki daerah ketidakstabilan tegangan ketika suatu gangguan menyebabkan kondisi sistem tersebut mengalami *drop* tegangan yang tidak dapat dikendalikan. Faktor utama yang menjadi penyebab ketidakstabilan ialah ketidakmampuan sistem tenaga dalam menyediakan daya reaktif. Sebuah kriteria untuk stabilitas tegangan adalah bahwa pada kondisi operasi yang diberikan untuk setiap bus dalam sistem dimana tegangan bus akan meningkat sesuai dengan injeksi daya reaktif pada bus yang sama juga meningkat. Fenomena ketidakstabilan tegangan dapat berlangsung cepat (jangka pendek) atau lambat (jangka panjang) (IEEE-CIGRE,2004). Tegangan dalam sistem dikatakan stabil apabila *drop* tegangan yang terjadi dalam sistem tidak melebihi dari 500 milidetik dan tegangan sistem kembali ke keadaan *steady state* (IEEE-Std,1995). Masalah stabilitas tegangan jangka pendek biasanya terkait dengan kecepatan tanggapan dari pengatur tegangan (misalnya, AVR) dan konverter daya elektronik. 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.

Untuk tujuan analisis, klasifikasi gangguan dalam studi stabilitas tegangan terdapat dua jenis gangguan,yaitu : (Prabha Kundur, 1994:32)

- a. Gangguan besar pada stabilitas tegangan berkaitan dengan kemampuan sistem untuk mengontrol tegangan saat terjadi gangguan, misalnya saat terjadi gangguan sistem, hilangnya pembangkit atau sirkuit. Kemampuan ini ditentukan oleh karakteristik beban dan sistem serta interaksi antara sistem proteksi dan kontrol. Adapun gangguan-gangguan hubung singkat pada sistem tiga fasa dapat ditunjukkan pada Gambar 2.6 :



Gambar 2.6 Jenis-jenis gangguan hubung singkat

Sumber : Grainger & Stevenson ,1994 : 478

Gangguan hubung singkat dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetris). Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu. Periode studi mungkin membutuhkan waktu dari beberapa detik sampai beberapa menit. Oleh sebab itu simulasi dinamis jangka panjang diperlukan dalam proses analisis ini. Sebuah kriteria untuk stabilitas tegangan gangguan besar adalah dengan memberikan gangguan dan mengikuti aksi dari sistem kontrol sehingga tegangan pada semua bus dalam sistem dapat mencapai tingkat *steady state* yang dapat diterima.

- b. Gangguan kecil pada stabilitas tegangan berkaitan dengan kemampuan sistem dalam mengendalikan besar tegangan mengikuti perubahan gangguan kecil misalnya perubahan pada sistem beban. Ketidakstabilan tegangan gangguan kecil pada dasarnya alami terjadi pada keadaan *steady state*. Oleh karena itu, analisis statis dapat secara efektif digunakan untuk menentukan margin stabilitas, mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi stabilitas dan memeriksa berbagai kondisi sistem.

2.8 Persamaan Dalam Studi Stabilitas

2.8.1 Persamaan Keadaan Mantab (*Steady State*)

Gambar 2.7 menunjukkan diagram fasor fluksi dan tegangan untuk mesin sinkron rotor silindris dimana efek kejenuhan diabaikan. Fluksi F_f sebanding dengan arus medan I_f dan ditunjukkan pada sumbu *direct* pada mesin. Tegangan terminal stator untuk rangkaian hubung-buka E_i sebanding dengan F_f yang berada pada sumbu *quadrature*. Tegangan E_i juga sebanding dengan tegangan medan E_f .

Ketika mesin sikron dibebani, fluksi F sebanding dan sefasa dengan arus stator yang dihasilkan yang mana penjumlahan secara vektor fluksi F_f memberikan sebuah nilai fluksi efektif F_e . Tegangan efektif stator E_l memiliki hubungan dengan F_e dan tertinggal sebesar 90° . Tegangan terminal V diperoleh dari tegangan E_l melalui pertimbangan jatuh tegangan karena adanya reaktansi X_l dan resistansi jangkar R_a . Perbedaan antara E_f dan E_l adalah pada fasa dengan jatuh tegangan pada $|X|$ dan sebanding dengan I . oleh karena itu, perbedaan tegangan dapat dikatakan sebagai jatuh tegangan pada reaktansi jangkar X_a . Jumlah antara X_l dan X_a disebut reaktansi sinkron (Arrilaga, 1990 : 159-160):

$$X_d = X_l + X_{ad} \quad (2.21)$$

$$X_q = X_l + X_{aq} \quad (2.22)$$

$$E_i - V_q = R_a I_q - X_d I_d \quad (2.23)$$

$$E_i - V_d = R_a I_d + X_d I_d \quad (2.24)$$

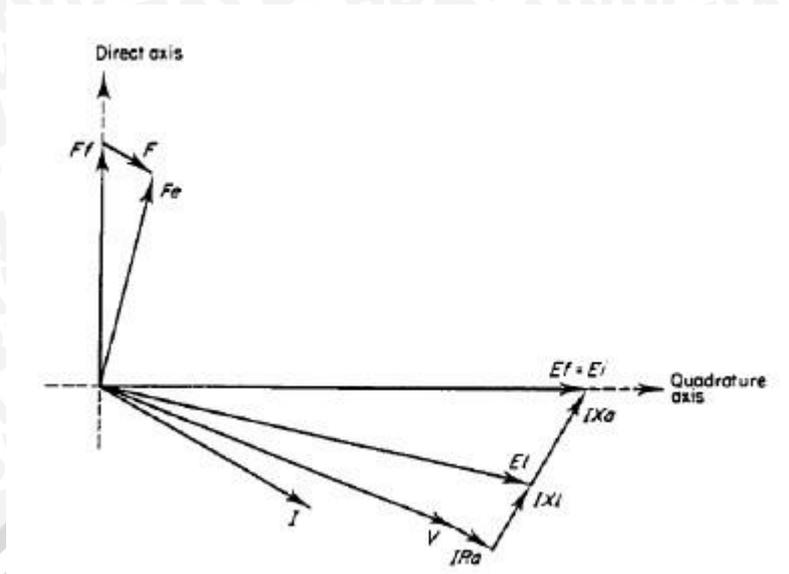
dengan :

X_d : reaktansi sumbu *direct*

X_q : reaktansi sumbu *quadrature*

I_d : arus jangkar sumbu *direct*

I_q : arus jangkar sumbu *quadrature*



Gambar 2.7 Diagram fasor mesin sinkron rotor silindris pada keadaan mantap

Sumber: Arrillaga, 1990 : 159

2.8.2 Persamaan Peralihan (*Transient*)

Untuk perubahan yang lebih cepat pada kondisi eksternal mesin sinkron, model di atas tidak lagi sesuai. Karena perubahan inersia gandengan fluks tidak tercermin di dalam model tersebut. Oleh karena itu, diperlukan suatu tegangan peralihan yang baru 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 E'_d dan E'_q (Arrilaga, 1990 : 160):

$$E'_q - Vq = Ra Iq - X'd Id \quad (2.25)$$

$$E'_d - Vd = Ra Id + X'q Iq \quad (2.26)$$

dengan :

E'_d : tegangan peralihan sumbu *direct*

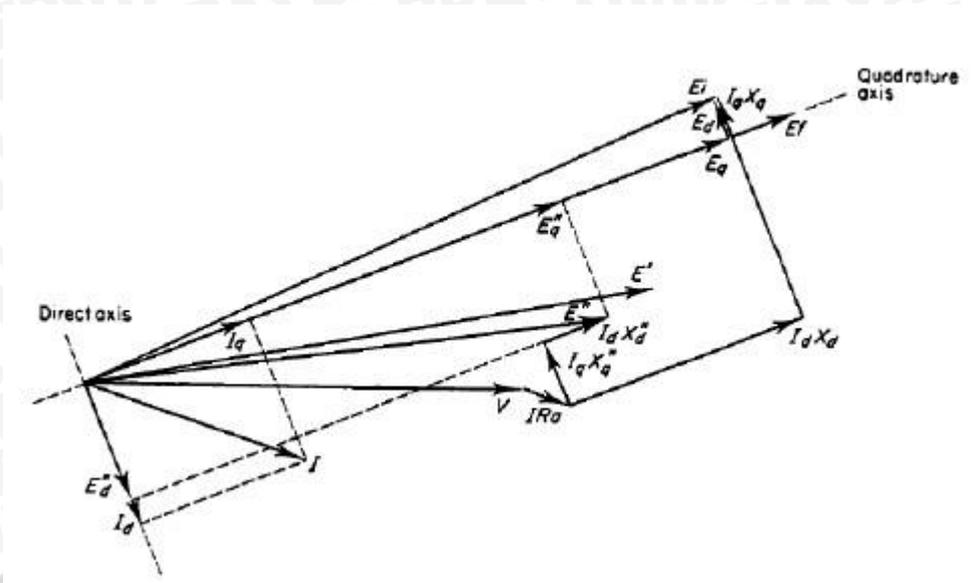
E'_q : tegangan peralihan sumbu *quadrature*

$X'd$: reaktansi peralihan sumbu *direct*

$X'q$: reaktansi peralihan sumbu *quadrature*

Sekarang tegangan E_i harus dianggap sebagai jumlah dari dua tegangan E_d dan E_q merupakan tegangan di belakang reaktansi sinkron. Pada bagian sebelumnya, dimana untuk keadaan mantap, arus mengalir hanya dalam kumparan medan sehingga dalam kasus tersebut $E_d = 0$ dan $E_q = E_i$.

Diagram fasor untuk operasi mesin pada kondisi peralihan ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut:



Gambar 2.8 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan peralihan

Sumber: Arrillaga ,1990 : 161

2.8.3 Persamaan Sub-peralihan (*Subtransient*)

Dalam kondisi sub-peralihan generator, kasus kumparan peredam (*dampers windings*) ataupun rangkaian lain yang terdapat dalam rotor, diperlukan jika pemodelan yang lebih tepat diperlukan. Reaktansi dan konstanta waktu yang dilibatkan kecil dan sering kali diabaikan. Dalam hal ini, diperlukan suatu tegangan sub-peralihan yang baru yaitu $E''d$ dan $E''q$. Tegangan peralihan ini dapat ditunjukkan melalui adanya reaktansi sub-peralihan generator sinkron yaitu $X''d$ dan $X''q$. Jika diperlukan, pengembangan dari persamaan ini identik dengan suatu kondisi sub-peralihan generator sinkron dan menghasilkan (Arrilaga, 1990 : 161):

$$E''q - Vq = Ra Iq - X''d Id \tag{2.27}$$

$$E''d - Vd = Ra Id + X''q Iq \tag{2.28}$$

dengan :

$E''d$: tegangan sub-peralihan sumbu *direct*

$E''q$: tegangan sub-peralihan sumbu *quadrature*

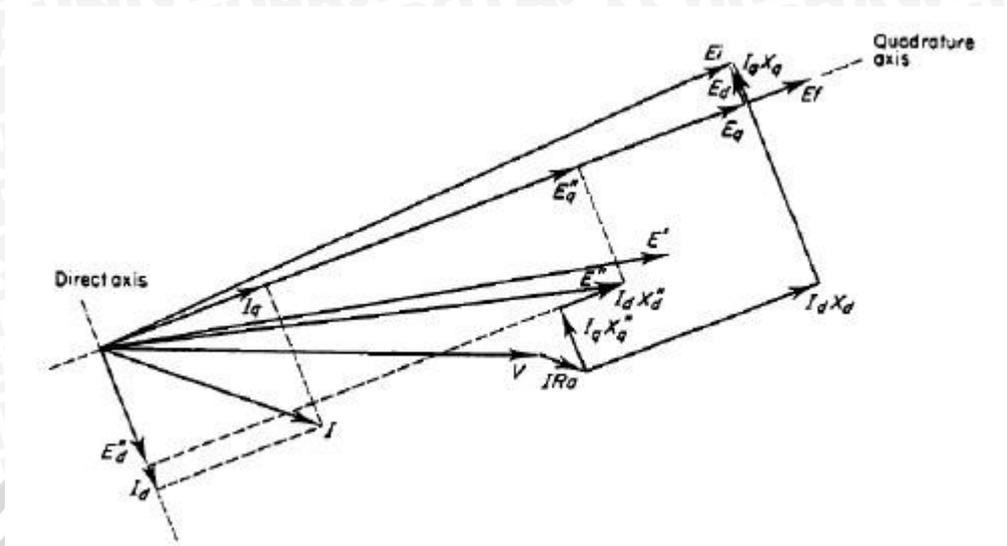
$X''d$: reaktansi sub-peralihan sumbu *direct*

$X''q$: reaktansi sub-peralihan sumbu *quadrature*

Persamaan tersebut dikembangkan dengan sebuah asumsi bahwa konstanta waktu peralihan lebih besar jika dibandingkan dengan konstanta waktu sub-peralihan. Diagram fasor dari mesin sinkron pada kondisi sub-peralihan ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Perlu dicatat bahwa Persamaan (2.27) dan (2.28) benar hanya pada kondisi operasi keadaan mantap.



Gambar 2.9 Diagram fasor mesin sinkron pada keadaan sub-peralihan

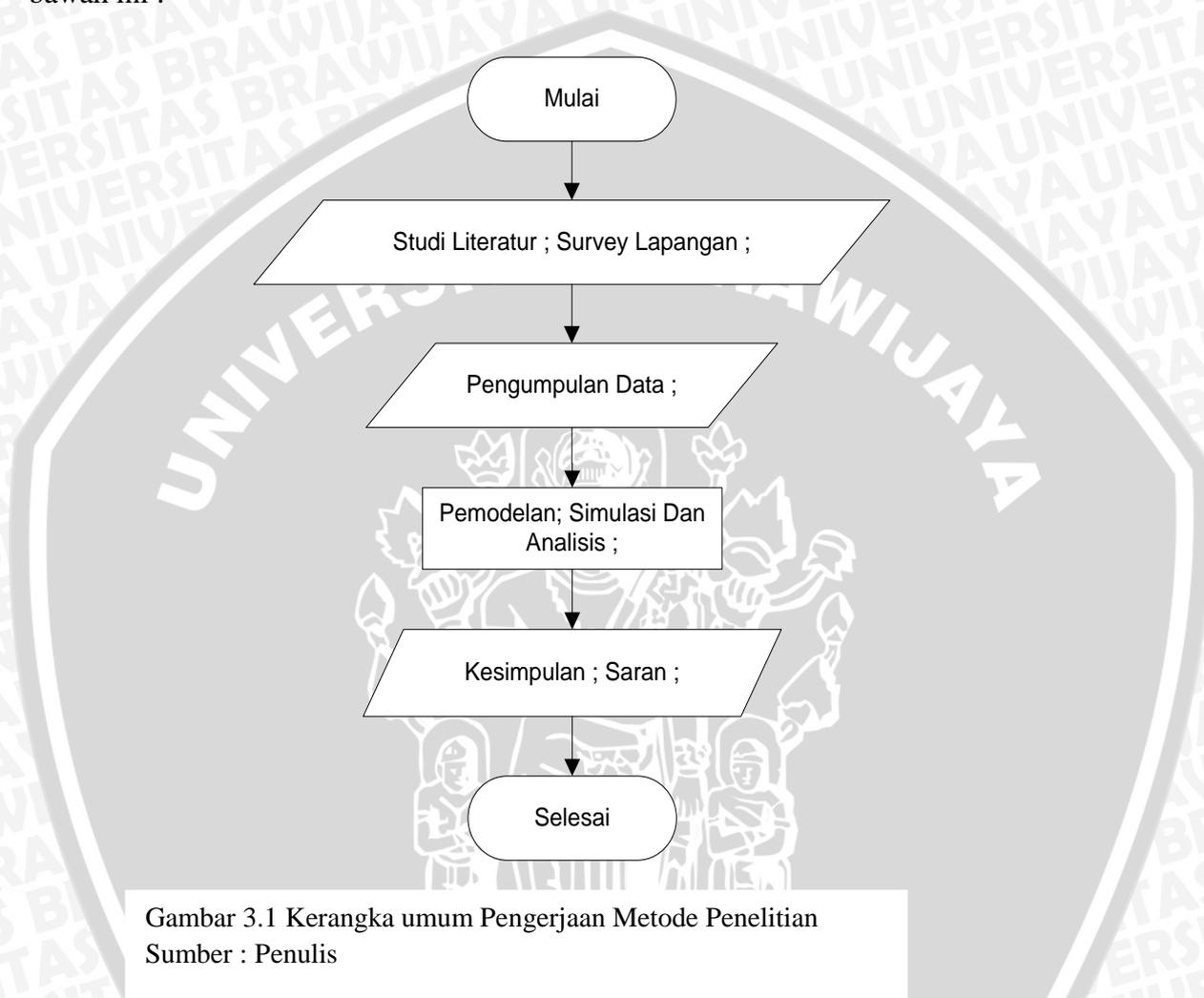
Sumber: Arrillaga ,1990 : 162



BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan dalam perencanaan kerja paralel 2 generator sinkron 3 fasa pada PLTMH ini dapat dilihat pada kerangka umum pada Gambar 3.1 di bawah ini :



Gambar 3.1 Kerangka umum Pengerjaan Metode Penelitian
Sumber : Penulis

3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari buku-buku literatur maupun dari situs internet untuk menjangkau dan mendukung dalam penyusunan skripsi ini antara lain mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro, Generator Sinkron 3 Fasa, Kerja Paralel Generator Sinkron 3 Fasa dan literatur-literatur pendukung lainnya.

3.2 Survey Lapangan

Kegiatan survei lapangan ini yaitu terjun langsung untuk mengamati dan mengetahui kondisi riil lapangan serta untuk mendapatkan informasi-informasi penting lain yang terkait guna melengkapi data-data yang diperlukan pada penulisan skripsi ini.

3.3 Pengumpulan Data

Data yang diperlukan pada Skripsi ini adalah :

1. 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, saluran dan beban).

2. Data Sekunder

Data-data yang diperlukan dalam kajian ini terdiri dari data sekunder yang bersumber dari buku referensi, jurnal, skripsi, dan internet.

3.4 Interkoneksi Generator Sinkron 3 Fasa

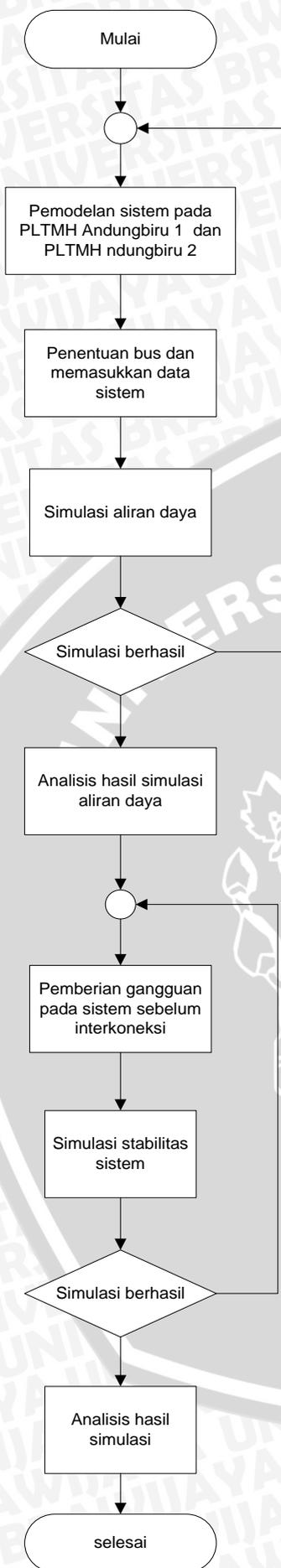
Pada penelitian ini peralatan interkoneksi menggunakan sinkronoskop hubungan lampu terang-gelap yang bisa dibidang merupakan perpaduan antara hubungan lampu terang dan hubungan lampu gelap.

3.5 Pemodelan

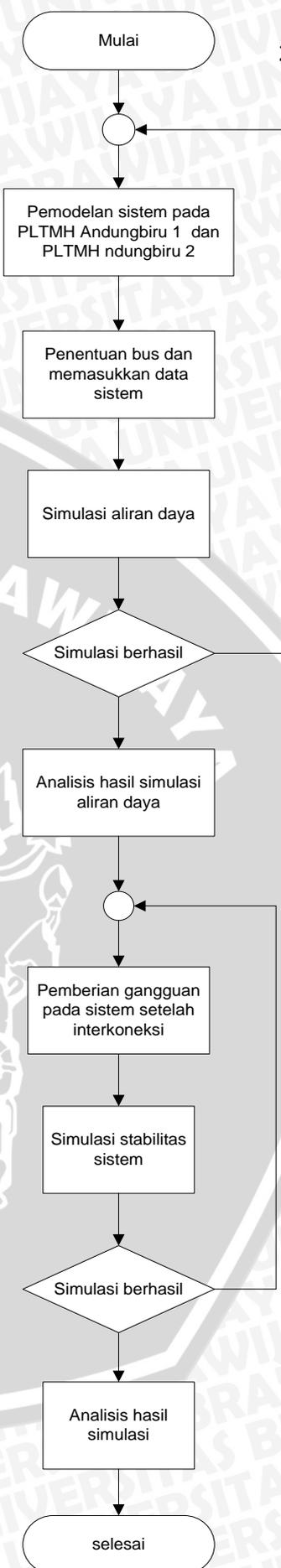
Pemodelan sistem tenaga pada kedua PLTMH dilakukan menggunakan perangkat lunak PSSE (*Power System for Engineering*) yang berfungsi untuk memodelkan kondisi sistem daya dan menyimulasikannya. Pemodelan sistem terdiri atas dua tahap, yang pertama pemodelan dibuat ketika kedua generator belum diparalelkan (interkoneksi) dan yang kedua pemodelan dibuat pada saat kedua generator telah dipararelkan (interkoneksi).

3.6 Simulasi

Langkah simulasi dan analisis pemodelan sistem yang telah dibuat digambarkan sesuai dengan diagram alir sebagai berikut :



Gambar 3.2 diagram alir simulasi sebelum interkoneksi
 Sumber : Penulis



Gambar 3.3 diagram alir simulasi setelah interkoneksi
 Sumber : Penulis



3.7 Kesimpulan Dan Saran

Dari hasil pembahasan dan analisis diambil suatu kesimpulan yang merupakan intisari dari penelitian ini dan disertakan pula saran dari penulis untuk pengembangan penelitian ke depan yang terkait dengan penelitian ini.



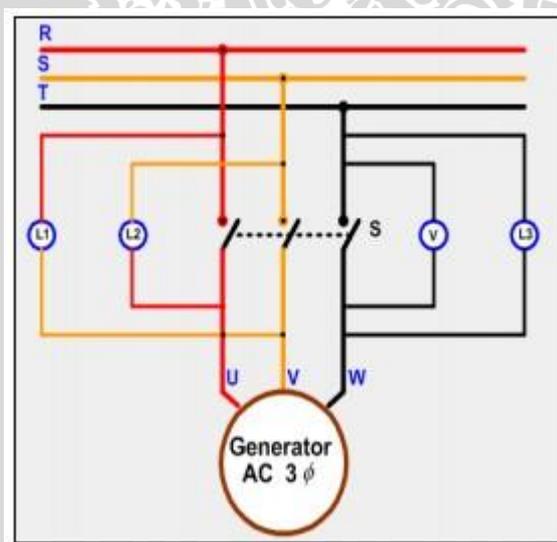
BAB IV

SIMULASI DAN PEMBAHASAN HASIL

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai perencanaan, simulasi dan analisis stabilitas system tenaga sebelum dan sesudah kerja paralel (interkoneksi) dari 2 generator sinkron 3 fasa pada PLTMH desa Andungbiru Kecamatan Tiris Kabupaten Probolinggo. Perencanaan kerja paralel menggunakan sinkronoskop lampu hubungan terang gelap serta simulasi dan analisis stabilitas sistem daya menggunakan perangkat lunak PSSE (*Power System Simulator for Engineering*).

4.1 Interkoneksi 2 Generator sinkron 3 Fasa

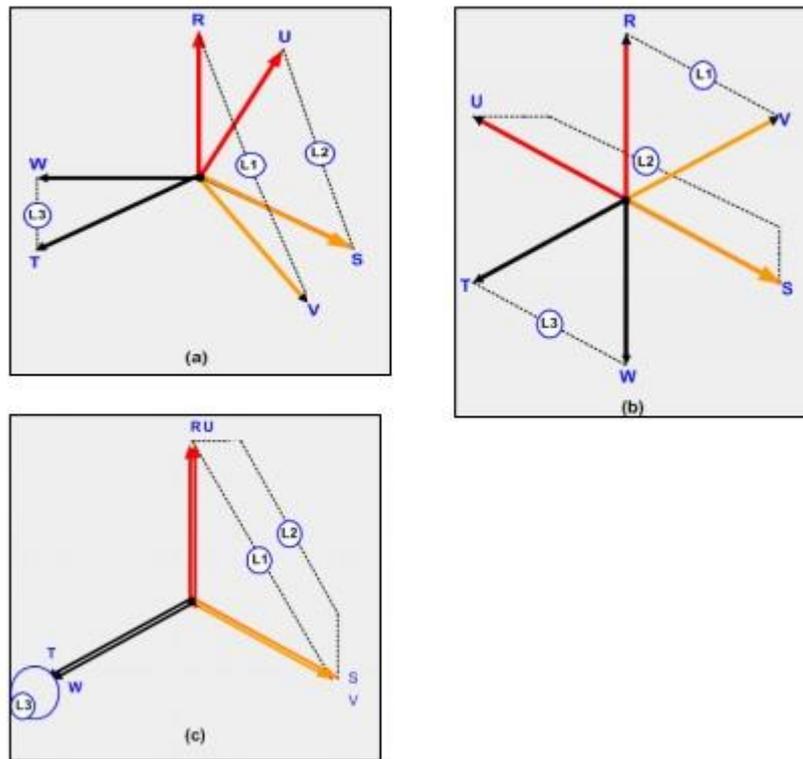
Peralatan interkoneksi 2 generator sinkron 3 fasa menggunakan sinkronoskop lampu hubungan terang-gelap. Prinsip dari sinkronoskop ini adalah dengan menghubungkan satu fasa sama dan dua fasa yang berlainan, yaitu fasa T dengan fasa W, fasa R dengan fasa V dan fasa S dengan fasa U. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada skema dibawah ini.



Gambar 4.1 Rangkaian interkoneksi Generator Sinkron 3 fasa

Sumber : Siswoyo, 2008 : 24

Pada sinkronoskop ini generator siap diparalel dengan jala-jala (generator lain), jika satu lampu gelap dan dua lampu lainnya terang. Pada kejadian ini dapat diterangkan pada gambar berikut ini.



Gambar 4.2 Hubungan Lampu Terang-Gelap

Sumber : Siswoyo, 2008 : 25

Perhatikan Gambar 4.2a, pada keadaan ini :

- L1 paling terang
- L2 terang
- L3 redup

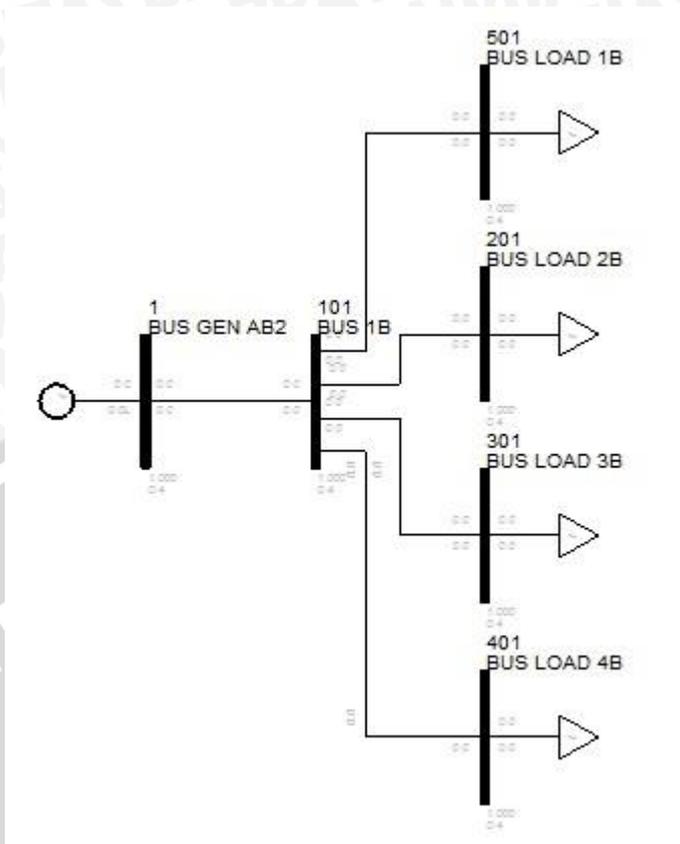
Perhatikan Gambar 4.2b, pada keadaan ini :

- L2 paling terang
- L1 terang
- L3 terang

Perhatikan gambar 4.2c, pada keadaan ini :

- L1 dan L2 sama terang
- L3 Gelap

Untuk ketentuan paralel generator dengan kapasitas berbeda maka beda keluaran daya reaktif dari setiap generator tidak boleh lebih kecil 15% dari keluaran daya reaktif generator kapasitas lebih besar dan tidak boleh lebih kecil 25% dari daya reaktif generator berkapasitas lebih kecil (BKI, 1996). Aturan ini dimaksudkan untuk keamanan dalam operasional generator pada kapasitas berbeda supaya tidak terjadinya

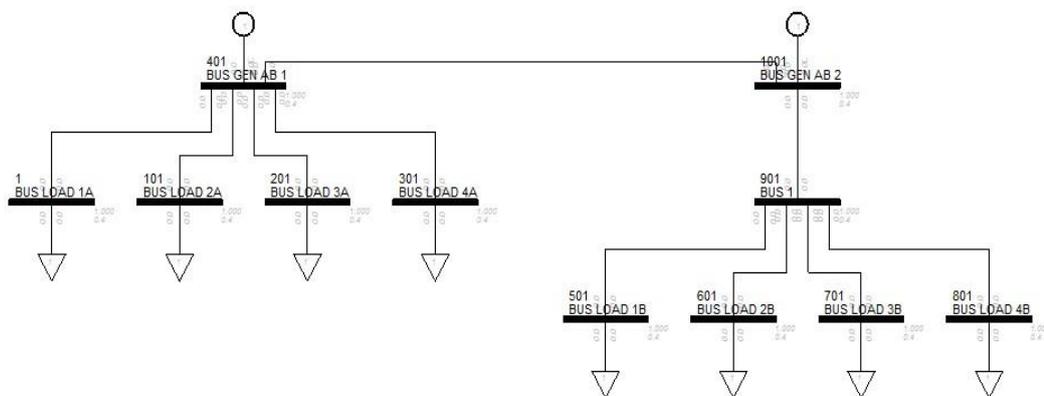


Gambar 4.4 Diagram segaris sistem daya PLTMH Andungbiru 2

Sumber : Penulis

3. Sistem daya interkoneksi PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2

Proses interkoneksi dilakukan dengan cara menghubungkan antara bus GEN AB1 dan bus GEN AB2. Diagram segaris interkoneksi diperlihatkan pada Gambar 4.5 berikut :



Gambar 4.5 Diagram segaris sistem daya interkoneksi kedua PLTMH

Sumber : Penulis

4.2.2 Data Generator

Dalam melakukan perhitungan mengenai parameter-parameter sistem daya dalam satuan p.u, maka dalam perhitungan akan digunakan teraan nilai dasar 1 MVA sebagai daya dasar dan tegangan 380 V sebagai tegangan dasar. Data-data yang diperlukan dalam melakukan analisis stabilitas meliputi daya, tegangan dan data dinamik generator seperti yang terdapat dalam lampiran. Nilai reaktansi generator dalam satuan p.u dapat diperoleh dengan mengkonversi satuan menggunakan persamaan 4.1.

$$X_{p.u(baru)} = X_{p.u(lama)} \left[\frac{kV_{lama\,dasar}}{kV_{baru\,dasar}} \right] \left[\frac{kV_{lama\,dasar}}{kV_{baru\,dasar}} \right]^2 \cdot \left[\frac{MVA_{baru\,dasar}}{MVA_{lama\,dasar}} \right] \quad (4.1)$$

Dengan menggunakan persamaan 4.1 maka nilai reaktansi dari generator dapat diketahui. Data generator setelah proses konversi ditunjukkan pada tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1 Data parameter dinamik generator

No	Parameter	AB1	AB2	satuan
1	S	0.04	0.016	p.u.
2	R	0.001	0.001	p.u.
3	xd	1.9	0.76	p.u.
4	xq	1.8	0.72	p.u.
5	xd'	0.28	0.112	p.u.
6	xq'	0.41	0.164	p.u.
7	xd''	0.115	0.046	p.u.
8	xq''	0.115	0.046	p.u.
9	Xl	0.095	0.038	p.u.
10	Tdo'	4.8	4.8	S
11	Tdo''	0.035	0.035	S
12	Tqo'	0.45	0.45	S
13	Tqo''	0.06	0.06	S
14	H	6	6	kJ/kVA
15	D	0	0	-
16	V	0.38	0.38	kV

Sumber : Hasil Perhitungan

4.2.3 Data Saluran

Data saluran sistem daya untuk PLTMH Andungbiru1 dan PLTMH Andungbiru2 ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut :

Tabel 4.2 Data saluran

No	PLTMH Andungbiru 1			PLTMH Andungbiru 2		
	saluran	R (p.u.)	X (p.u.)	saluran	R (p.u.)	X (p.u.)
1	BUS GEN AB1-BUS LOAD 1A	0.506778	0.423186	BUS GEN AB2-BUS 1	0.443009	0.369935
2	BUS GEN AB1-BUS LOAD 2A	0.444514	0.371192	BUS 1-BUS LOAD 1B	0.707999	0.423186
3	BUS GEN AB1-BUS LOAD 3A	0.501888	0.419102	BUS 1-BUS LOAD 2B	0.464975	0.388278
4	BUS GEN AB1-BUS LOAD 4A	1.208545	1.009197	BUS 1-BUS LOAD 3B	0.501888	0.406195
5	-			BUS 1-BUS LOAD 4B	1.208545	0.3084

Sumber : Hasil perhitungan

4.2.4 Data Beban

Nilai pembebanan pada PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2 sesuai dengan pemodelan sistem daya pada gambar 4.3 dan gambar 4.4 ditunjukkan pada tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Data pembebanan 2 PLTMH

PLTMH Andungbiru 1			PLTMH Andungbiru 2		
pembebanan	P (W)	Q (Var)	Pembebanan	P (W)	Q (Var)
BUS GEN AB1-BUS LOAD 1A	3000.61	1675.15	BUS GEN AB2-BUS 1	3380.89	1893.53
BUSGEN AB1-BUS LOAD 2A	416.79	237.47	BUS 1-BUS LOAD 1B	1258.68	691.04
BUS GEN AB1-BUS LOAD 3A	3447.51	1980.33	BUS 1-BUS LOAD 2B	857.09	473.42
BUS GEN AB1-BUS LOAD 4A	2518.52	1523.62	BUS 1-BUS LOAD 3B	422.09	247.86
-			BUS 1-BUS LOAD 4B	843.03	481.21
Total	9383.43	5416.57	Total	3380.89	1893.53

Sumber : Survey lapangan

4.3 Simulasi Aliran Daya

Simulasi aliran daya dilakukan untuk mengetahui kondisi awal sistem sebelum dilakukan analisis stabilitas sistem daya. Proses simulasi aliran daya ini berdasarkan atas diagram segaris sistem dan data-data yang telah dibahas sebelumnya meliputi data pembangkit, saluran dan beban. Simulasi akan terbagi menjadi dua keadaan, yaitu keadaan saat sebelum dan setelah interkoneksi dua PLTMH dilakukan.

4.3.1 Simulasi Aliran Daya PLTMH Andungbiru 1

Dalam melakukan simulasi aliran daya pada PLTMH Andungbiru 1, akan ditetapkan bus GEN AB1 sebagai *slack bus* dan yang lain ditentukan sebagai *PQ bus*. Data pembangkit, saluran dan pembebanan sesuai dengan pembahasan sebelumnya. Dari hasil simulasi aliran daya di PLTMH Andungbiru 1 diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Data aliran daya PLTMH Andungbiru 1

No	Nama Bus	Voltage (pu)	Sudut (°)	Pgen (MW)	Qgen (Mvar)	Pbeban (MW)	Qbeban (Mvar)
1	GEN AB1	1	0	0.0094	0.0054	0.0000	0.0000
2	LOAD 1A	0.9991	0.01	0.0000	0.0000	0.003	0.0017
3	LOAD 2A	0.9999	0	0.0000	0.0000	0.0004	0.0002
4	LOAD 3A	0.999	0.02	0.0000	0.0000	0.0034	0.002
5	LOAD 4A	0.9982	0.03	0.0000	0.0000	0.0025	0.0015

Sumber : Hasil simulasi

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

Total pembangkitan	P : 0.0094 MW Q : 0.0054 MVar
Total beban	P : 0.0093 MW Q : 0.0054 MVar
Total rugi daya	P : 0,0001 MW Q : 0.0000 MVar

4.3.2 Simulasi Aliran Daya PLTMH Andungbiru 2

Dalam melakukan simulasi aliran daya pada PLTMH Andungbiru 1, akan ditetapkan bus GEN AB2 sebagai *slack bus* dan yang lain ditentukan sebagai *PQ bus*. Data pembangkit, saluran dan pembebanan sesuai dengan pembahasan sebelumnya.

Dari hasil simulasi aliran daya di PLTMH Andungbiru 1 diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.5 berikut:

Tabel 4.5 Data aliran daya PLTMH Andungbiru 2

No	Nama Bus	Voltage (pu)	Sudut (°)	Pgen (MW)	Qgen (Mvar)	Pbeban (MW)	Qbeban (Mvar)
1	GEN AB2	1	0	0.0034	0.0019	0.0000	0.0000
2	1	0.9991	0.01	0.0000	0.0000	0.0034	0.0019
3	LOAD 1B	0.9986	0.02	0.0000	0.0000	0.0013	0.0007
4	LOAD 2B	0.9989	0.02	0.0000	0.0000	0.0009	0.0005
5	LOAD 3B	0.999	0.01	0.0000	0.0000	0.0004	0.0002
6	LOAD 4B	0.999	0.02	0.0000	0.0000	0.0008	0.0005

Sumber : Hasil simulasi

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

Total pembangkitan	P : 0.0034 MW Q : 0.0019 MVar
Total beban	P : 0.0034 MW Q : 0.0019 MVar
Total rugi daya	P : 0,0000 MW Q : 0.0000 MVar

4.3.3 Simulasi Aliran Daya Pada Sistem Interkoneksi.

Simulasi aliran daya pada sistem interkoneksi dilakukan dengan menghubungkan bus GEN AB1 dengan bus GEN AB2 sesuai dengan gambar 4.3. Penetapan jenis bus, yaitu *slack bus*, *PV bus* dan *PQ bus* pada sistem daya interkoneksi telah dibahas pada pembahasan sebelumnya. Hasil simulasi aliran daya pada sistem interkoneksi ditunjukkan pada tabel 4.6 berikut:

Tabel 4.6 Data aliran daya pada sistem interkoneksi

No	Nama Bus	Voltage (pu)	Sudut (°)	Pgen (MW)	Qgen (Mvar)	Pbeban (MW)	Qbeban (Mvar)
1	GEN AB1	1	0	0.0101	0.0073	0.0000	0.0000
2	GEN AB2	1	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	1	0.9991	0.01	0.0000	0.0000	0.0034	0.0019
4	LOAD 1A	0.9998	0.02	0.0000	0.0000	0.0003	0.0017
5	LOAD 2A	0.9999	0	0.0000	0.0000	0.0004	0.0002
6	LOAD 3A	0.999	0.02	0.0000	0.0000	0.0034	0.002
7	LOAD 4A	0.9982	0.03	0.0000	0.0000	0.0025	0.0015
8	LOAD 1B	0.9986	0.02	0.0000	0.0000	0.0013	0.0007

9	LOAD 2B	0.9989	0.02	0.0000	0.0000	0.0009	0.0005
10	LOAD 3B	0.999	0.01	0.0000	0.0000	0.0004	0.0002
11	LOAD 4B	0.999	0.02	0.0000	0.0000	0.0008	0.0005

Sumber : Hasil simulasi

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

Total pembangkitan	P : 0.0101 MW Q : 0.0073 MVar
Total beban	P : 0.0100 MW Q : 0.0073 MVar
Total rugi daya	P : 0,0001 MW Q : 0.0000 MVar

4.4 Simulasi Stabilitas Tegangan dan Sudut Rotor Sebelum Interkoneksi.

Simulasi stabilitas ini dilakukan pada saat sumber daya dua PLTMH belum diinterkoneksi. Dimana setiap PLTMH yaitu PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2 memiliki sumber energi listrik dari generator sinkron 3 fasa sesuai dengan pembahasan sebelumnya. Dalam analisis stabilitas ini akan ditentukan daya dasar sebesar 1 MVA dan 0,38 kV sebagai tegangan dasar, waktu gangguan pada detik ke-1 dan waktu gangguan selama 0,15 detik. Gangguan yang digunakan pada simulasi ini adalah gangguan 3 fasa.

4.4.1 Simulasi Stabilitas Tegangan dan Sudut Rotor Pada Sistem Daya PLTMH Andungbiru 1

Dalam melakukan simulasi stabilitas tegangan dan sudut rotor ini, akan dilakukan letak gangguan pada sistem daya diberikan pada bus dengan beban terbesar (bus LOAD 3A) dan beban terkecil (bus LOAD 2A). Data yang ditampilkan berupa data grafik ketika sebelum, saat dan setelah gangguan terjadi. Hasil simulasi stabilitas tegangan dan sudut rotor pada sistem daya di PLTMH Andungbiru 1 sebelum interkoneksi sesuai dengan pembahasan berikut :

- Letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 3A).

Hasil simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 3A) ditunjukkan pada Gambar 4.6 dan Tabel 4.7.



Gambar 4.6 Grafik tegangan = $f(t)$ pada bus GEN AB1 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 3A

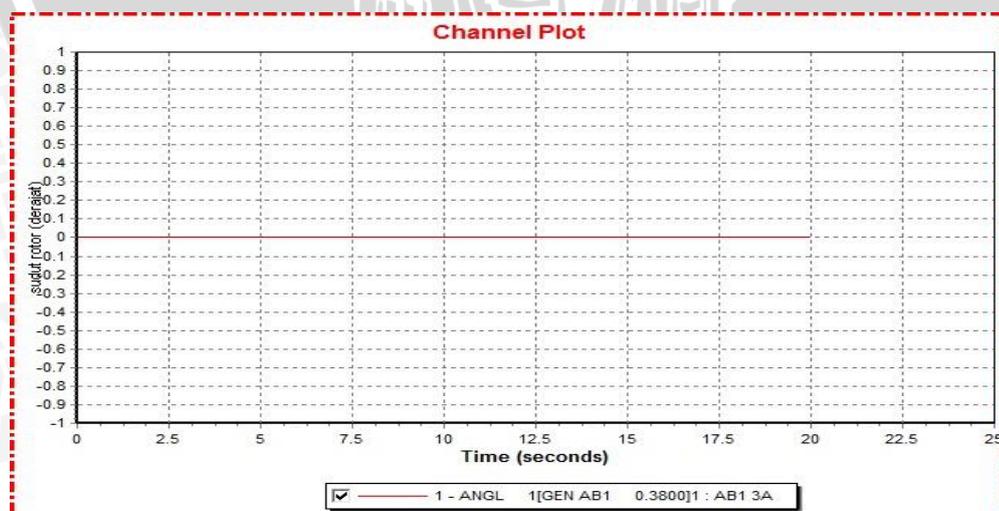
Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.7 Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 3A

Bus	V_{awal} (p.u.)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
GEN AB1	1	0.392147	150

Sumber : Hasil simulasi

Pada hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa pada bus GEN AB1 tegangan sebelum gangguan terjadi ialah 1 p.u. Pada saat terjadi gangguan di detik ke-1, tegangan menurun menjadi 0.392147 p.u. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, tegangan kembali ke operasi normal setelah sebelumnya mengalami osilasi. Pada tabel 4.7 menunjukkan gangguan terjadi selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam kondisi stabil.



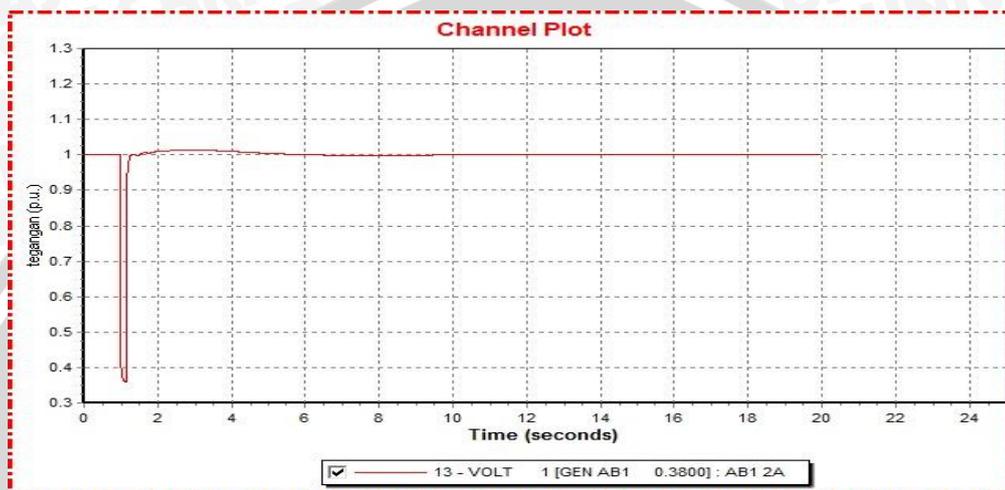
Gambar 4.7 Grafik sudut rotor = $f(t)$ pada bus GEN AB1 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 3A

Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi stabilitas untuk sudut rotor, terlihat bahwa ketika gangguan terjadi dan setelah gangguan terjadi sudut rotornya tidak terjadi perubahan, hal ini dikarenakan sistem hanya terdiri dari satu pembangkit saja.

- Letak gangguan pada bus beban terkecil (bus LOAD 2A).

Hasil simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus beban terkecil (bus LOAD 2A) ditunjukkan pada Gambar 4.8 dan Tabel 4.8.



Gambar 4.8 Grafik tegangan = $f(t)$ pada bus GEN AB1 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 2A

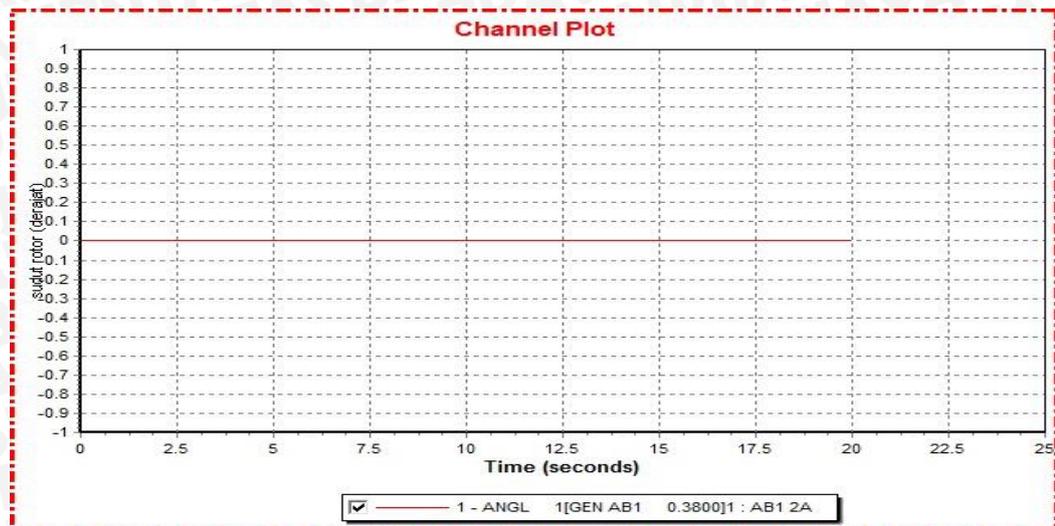
Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.8 Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 2A

Bus	V_{awal} (p.u.)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
GEN AB1	1	0.3597	150

Sumber : Hasil simulasi

Pada hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa pada bus GEN AB1 tegangan sebelum gangguan terjadi ialah 1 p.u. Pada saat terjadi gangguan di detik ke-1, tegangan menurun menjadi 0.3597 p.u. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, tegangan kembali ke operasi normal setelah sebelumnya mengalami osilasi. Pada tabel 4.8 menunjukkan gangguan terjadi selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.9 Grafik sudut rotor = $f(t)$ pada bus GEN AB1 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 2A
Sumber : Hasil simulasi

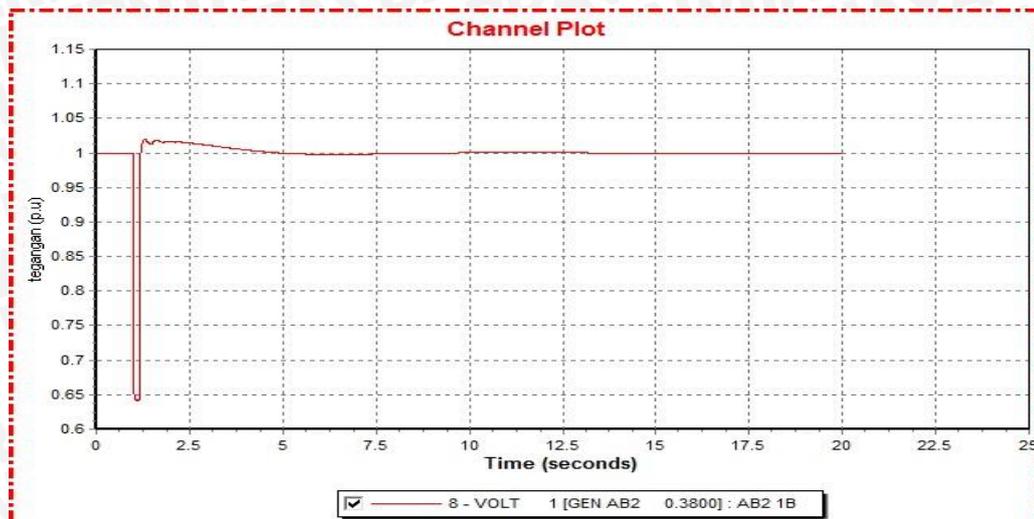
Dari hasil simulasi stabilitas untuk sudut rotor, terlihat bahwa ketika gangguan terjadi dan setelah gangguan terjadi sudut rotornya tidak terjadi perubahan, hal ini dikarenakan sistem hanya terdiri dari satu pembangkit saja.

4.4.2 Simulasi Stabilitas Tegangan dan Sudut Rotor Pada Sistem Daya PLTMH Andungbiru 2

Dalam melakukan simulasi stabilitas tegangan dan sudut rotor ini, akan dilakukan letak gangguan pada sistem daya untuk bus dengan beban terbesar (bus LOAD 1B) dan beban terkecil (bus LOAD 3B). Data yang ditampilkan berupa data grafik ketika sebelum, saat dan setelah gangguan terjadi. Hasil simulasi stabilitas tegangan dan sudut rotor pada sistem daya di PLTMH Andungbiru 2 sebelum interkoneksi sesuai dengan pembahasan berikut :

- Letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 1B).

Hasil simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 1B) ditunjukkan pada Gambar 4.10 dan Tabel 4.9.



Gambar 4.10 Grafik tegangan = f(t) pada bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 1B
 Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.9 Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 1B

Bus	V _{awal} (p.u.)	V _{drop} (p.u.)	t _{drop} (milidetik)
GEN AB1	1	0.641973	150

Sumber : Hasil simulasi

Pada hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa pada bus GEN AB1 tegangan sebelum gangguan terjadi ialah 1 p.u. Pada saat terjadi gangguan di detik ke-1, tegangan menurun menjadi 0.64193 p.u. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, tegangan kembali ke operasi normal setelah sebelumnya mengalami osilasi. Pada tabel 4.9 menunjukkan gangguan terjadi selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam kondisi stabil.

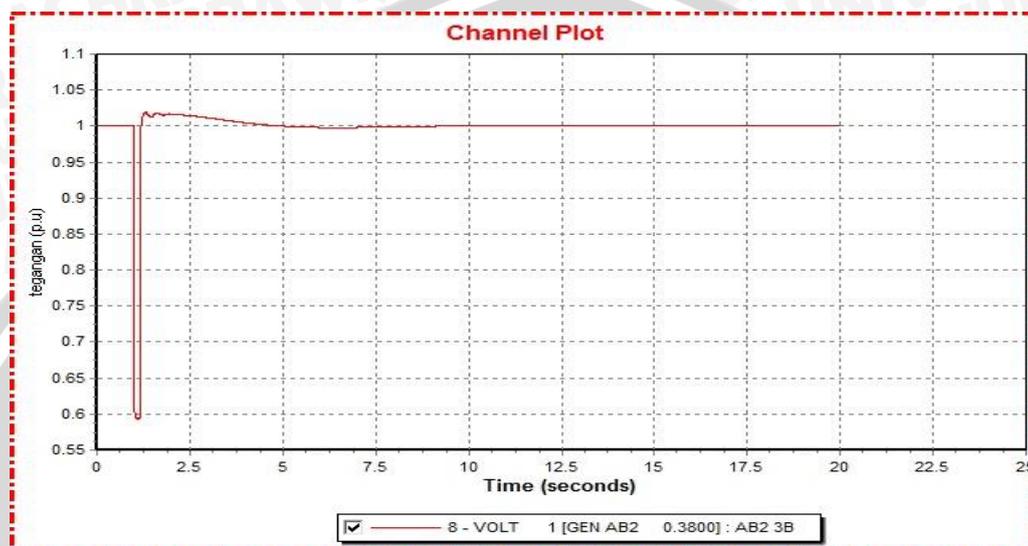


Gambar 4.11 Grafik sudut rotor = f(t) pada bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 1B
 Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi stabilitas untuk sudut rotor, terlihat bahwa ketika gangguan terjadi dan setelah gangguan terjadi sudut rotornya tidak terjadi perubahan, hal ini dikarenakan sistem hanya terdiri dari satu pembangkit saja.

- Letak gangguan pada bus beban terkecil (bus LOAD 3B).

Hasil simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus beban terkecil (bus LOAD 3B) ditunjukkan pada Gambar 4.12 dan Tabel 4.10.



Gambar 4.12 Grafik tegangan = $f(t)$ pada bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 3B

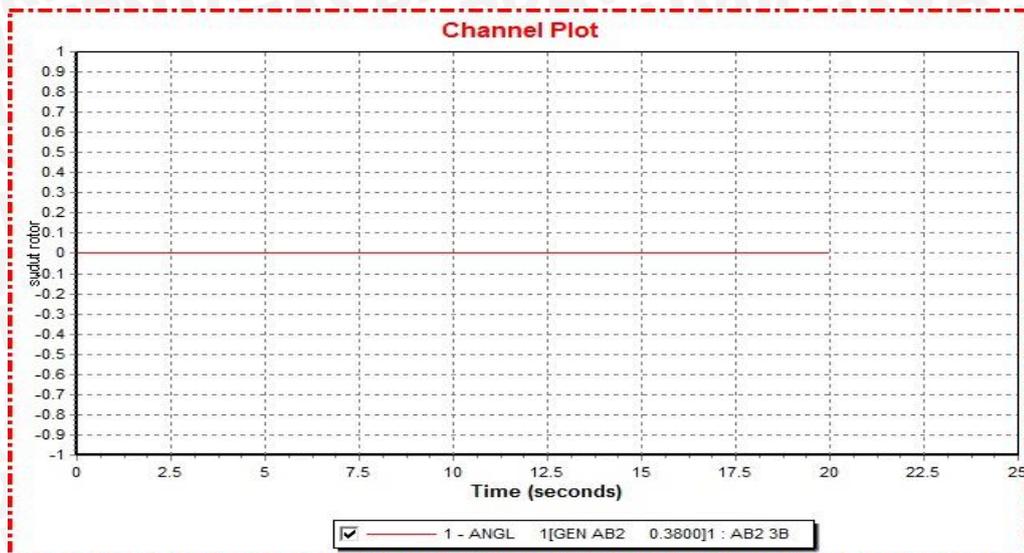
Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.10 Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 3B

Bus	V_{awal} (p.u)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
GEN AB1	1	0.592753	150

Sumber : Hasil simulasi

Pada hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa pada bus GEN AB1 tegangan sebelum gangguan terjadi ialah 1 p.u. Pada saat terjadi gangguan di detik ke-1, tegangan menurun menjadi 0.592753 p.u. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, tegangan kembali ke operasi normal setelah sebelumnya mengalami osilasi. Pada tabel 4.10 menunjukkan gangguan terjadi selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.13 Grafik sudut rotor = $f(t)$ pada bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus LOAD 3B

Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi stabilitas untuk sudut rotor, terlihat bahwa ketika gangguan terjadi dan setelah gangguan terjadi sudut rotornya tidak terjadi perubahan, hal ini dikarenakan sistem hanya terdiri dari satu pembangkit saja.

4.4.3 Simulasi Stabilitas Tegangan dan Sudut Rotor Setelah Interkoneksi.

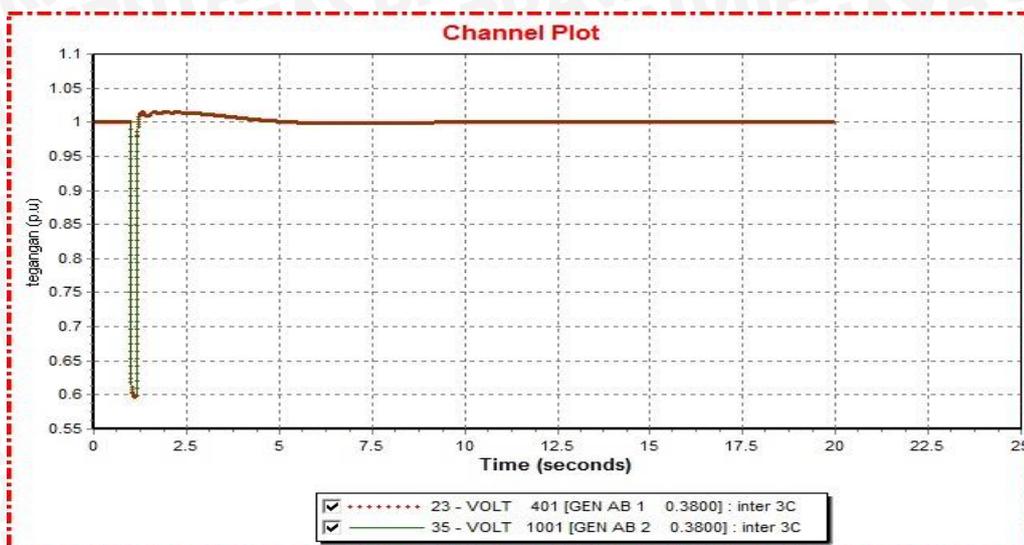
Simulasi stabilitas tegangan dan sudut rotor setelah interkoneksi ini akan menampilkan stabilitas tegangan dan sudut rotor setelah kedua pembangkit PLTMH dihubungkan dengan saluran interkoneksi yang dihubungkan antar bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 sesuai dengan gambar 4.5. Untuk letak gangguan pada simulasi stabilitas setelah interkoneksi merupakan gabungan dari letak gangguan simulasi stabilitas sebelum interkoneksi yaitu terletak pada bus beban terbesar (bus LOAD 3A) dan beban terkecil (bus LOAD 2A) di PLTMH Andungbiru 1 dan bus beban terbesar (bus LOAD 1B) dan beban terkecil (bus LOAD 3B) di PLTMH Andungbiru 2.

Dalam simulasi ini akan ditampilkan grafik tegangan terhadap fungsi waktu, kemudian akan dianalisis dampak gangguan terhadap stabilitas tegangan dan sudut rotor pada sistem setelah interkoneksi.

Hasil simulasi stabilitas tegangan dan sudut rotor setelah interkoneksi untuk letak gangguan masing-masing diperlihatkan pada pembahasan berikut :

- Letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 3A).

Hasil simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 1B) ditunjukkan pada Gambar 4.14 dan Tabel 4.11.



Gambar 4.14 Grafik tegangan = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 3A

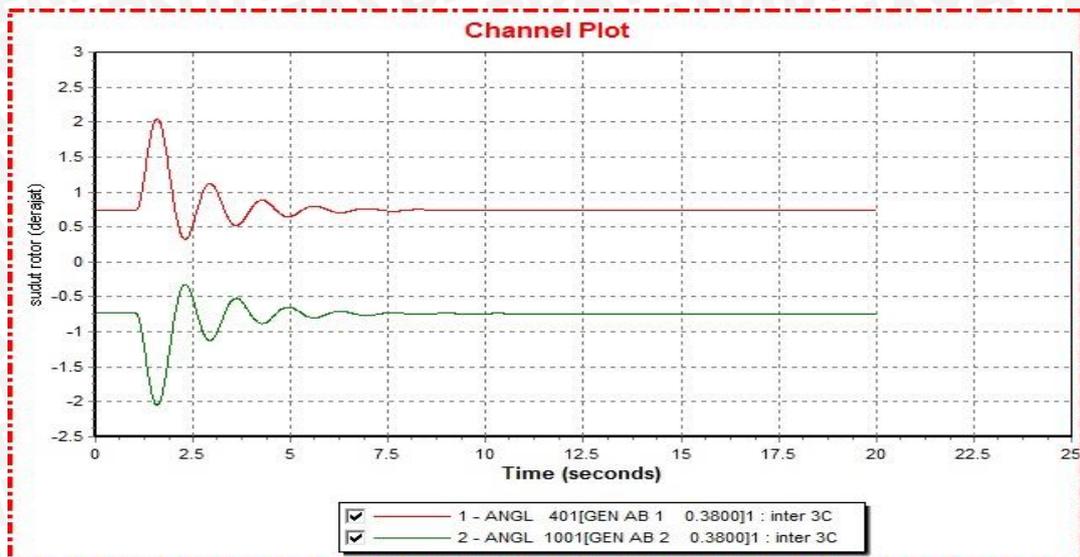
Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.11 Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 3A setelah interkoneksi

Bus	V_{awal} (p.u)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
GEN AB1	1	0.597525	150
GEN AB2	1	0.597525	150

Sumber : Hasil simulasi

Pada hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa tegangan sebelum gangguan terjadi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 ialah 1 p.u. Pada saat terjadi gangguan di detik ke-1, tegangan pada bus Gen AB1 dan bus GEN AB2 sama-sama menurun menjadi 0.597525 p.u. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, tegangan kembali ke operasi normal setelah sebelumnya mengalami osilasi. Pada tabel 4.11 menunjukkan gangguan terjadi selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.15 Grafik sudut rotor = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 3A

Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.12 Simulasi stabilitas sudut rotor letak gangguan pada bus LOAD 3A setelah interkoneksi

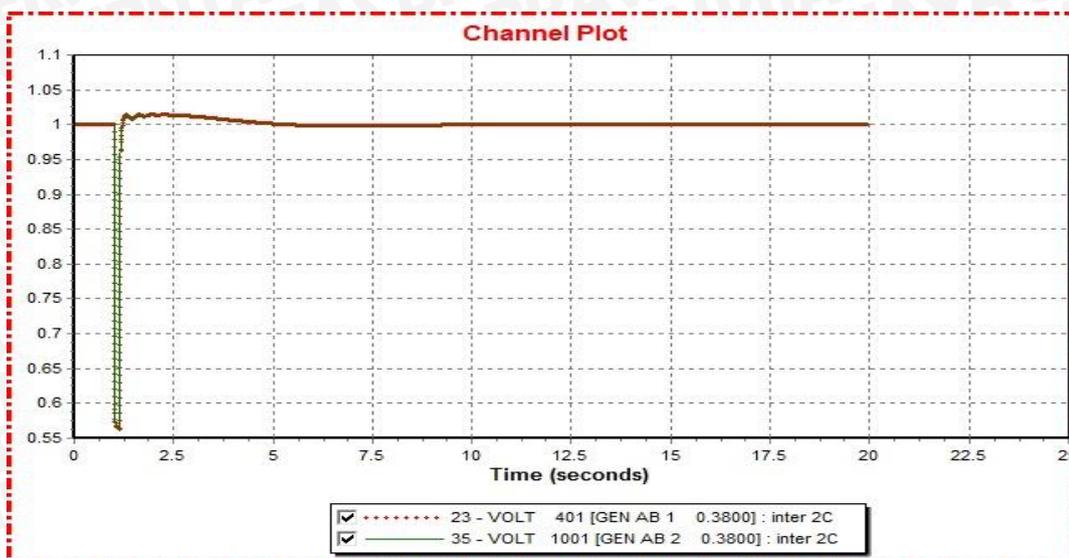
Generator		$\delta_{awal} (^{\circ})$	$\delta_{selama\ gangguan} (^{\circ})$
AB1	maks	0.734974	2.048723
	min		0.320168
AB2	maks	-0.73497	-0.320168
	min		-2.048723

Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi stabilitas sudut rotor terlihat jika gangguan menyebabkan terjadinya osilasi. Setelah gangguan terjadi sudut rotor pada GEN AB1 dan sudut rotor GEN AB2 bisa kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam keadaan stabil.

- Letak gangguan pada bus beban terkecil (bus LOAD 2A).

Hasil simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 1B) ditunjukkan pada Gambar 4.16 dan Tabel 4.13.



Gambar 4.16 Grafik tegangan = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 2A

Sumber : Hasil simulasi

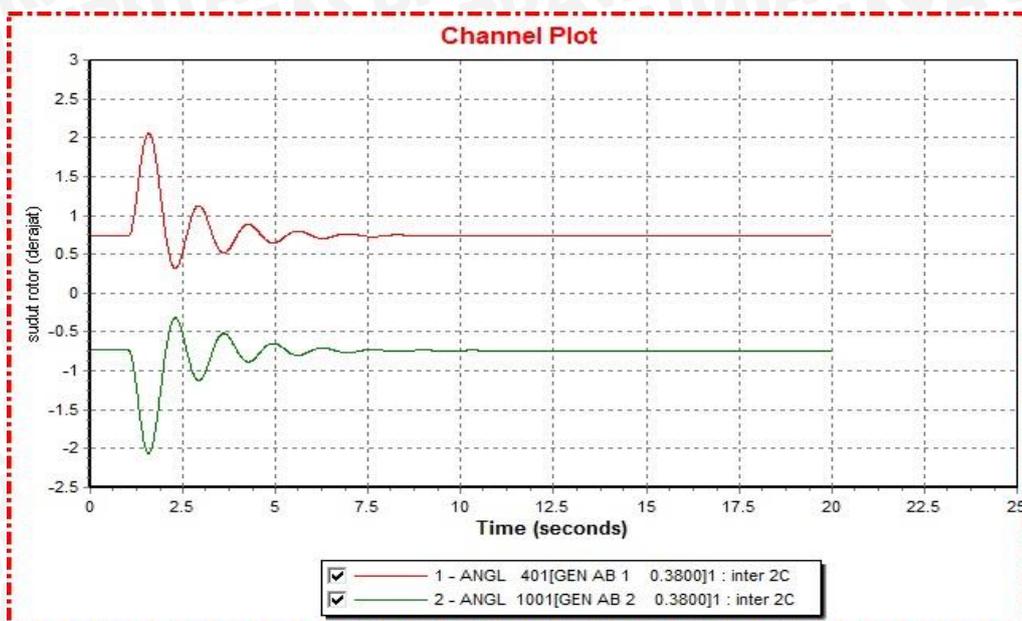
Tabel 4.13 Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 2A setelah interkoneksi

Bus	V_{awal} (p.u.)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
GEN AB1	1	0.563567	150
GEN AB2	1	0.563567	150

Sumber : Hasil simulasi

Pada hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa tegangan sebelum gangguan terjadi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 ialah 1 p.u. Pada saat terjadi gangguan di detik ke-1, tegangan pada bus Gen AB1 dan bus GEN AB2 sama-sama menurun menjadi 0.563567 p.u. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, tegangan kembali ke operasi normal setelah sebelumnya mengalami osilasi. Pada tabel 4.13 menunjukkan gangguan terjadi selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam kondisi stabil.





Gambar 4.17 Grafik sudut rotor = f(t) setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 2A

Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.14 Simulasi stabilitas sudut rotor letak gangguan pada bus LOAD 2A setelah interkoneksi

Generator		$\delta_{awal} (^{\circ})$	$\delta_{selama\ gangguan} (^{\circ})$
AB1	maks	0.734974	2.058743
	min		0.318031
AB2	maks	-0.73497	-0.318031
	min		-2.058743

Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi stabilitas sudut rotor terlihat jika gangguan menyebabkan terjadinya osilasi. Setelah gangguan terjadi sudut rotor pada GEN AB1 dan sudut rotor GEN AB2 bisa kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam keadaan stabil.

- Letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 1B).

Hasil simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus beban terbesar (bus LOAD 1B) ditunjukkan pada Gambar 4.18 dan Tabel 4.15.





Gambar 4.18 Grafik tegangan = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 1B

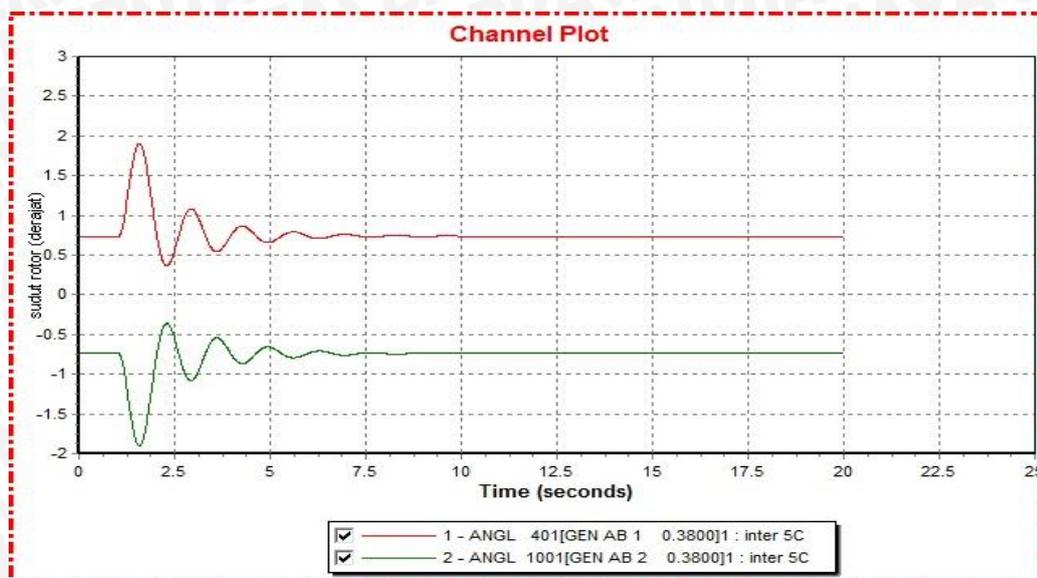
Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.15 Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 1B setelah interkoneksi

Bus	V_{awal} (p.u)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
GEN AB1	1	0.790126	150
GEN AB2	1	0.790126	150

Sumber : Hasil simulasi

Pada hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa tegangan sebelum gangguan terjadi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 ialah 1 p.u. Pada saat terjadi gangguan di detik ke-1, tegangan pada bus Gen AB1 dan bus GEN AB2 sama-sama menurun menjadi 0.790126 p.u. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, tegangan kembali ke operasi normal setelah sebelumnya mengalami osilasi. Pada tabel 4.15 menunjukkan gangguan terjadi selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.19 Grafik sudut rotor = f(t) setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 1B

Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.16 Simulasi stabilitas sudut rotor letak gangguan pada bus LOAD 1B setelah interkoneksi

Generator		$\delta_{awal} (^{\circ})$	$\delta_{selama\ gangguan} (^{\circ})$
AB1	maks	0.734974	1.901674
	min		0.504246
AB2	maks	-0.73497	-0.504246
	min		-1.901674

Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi stabilitas sudut rotor terlihat jika gangguan menyebabkan terjadinya osilasi. Setelah gangguan terjadi sudut rotor pada GEN AB1 dan sudut rotor GEN AB2 bisa kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam keadaan stabil.

- Letak gangguan pada bus beban terkecil (bus LOAD 3B).

Hasil simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus beban terkecil (bus LOAD 1B) ditunjukkan pada Gambar 4.20 dan Tabel 4.17.



Gambar 4.20 Grafik tegangan = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 3B

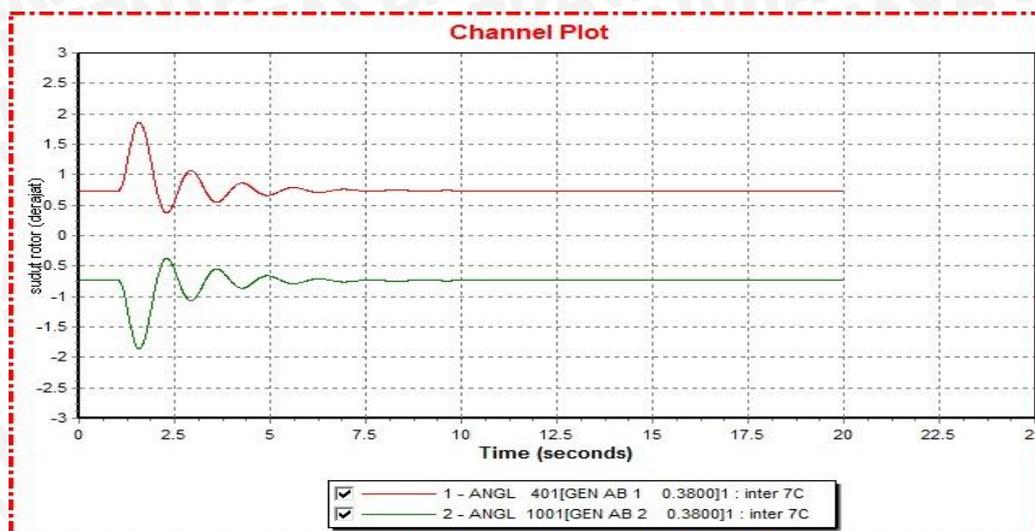
Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.17 Simulasi stabilitas tegangan letak gangguan pada bus LOAD 3B setelah interkoneksi

Bus	V_{awal} (p.u.)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
GEN AB1	1	0.750573	150
GEN AB2	1	0.750573	150

Sumber : Hasil simulasi

Pada hasil simulasi tersebut dapat dilihat bahwa tegangan sebelum gangguan terjadi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 ialah 1 p.u. Pada saat terjadi gangguan di detik ke-1, tegangan pada bus Gen AB1 dan bus GEN AB2 sama-sama menurun menjadi 0.750573 p.u. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, tegangan kembali ke operasi normal setelah sebelumnya mengalami osilasi. Pada tabel 4.17 menunjukkan gangguan terjadi selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam kondisi stabil.



Gambar 4.21 Grafik sudut rotor = $f(t)$ setelah interkoneksi pada bus GEN AB1 dan bus GEN AB2 saat diberikan gangguan pada bus load 3B

Sumber : Hasil simulasi

Tabel 4.18 Simulasi stabilitas sudut rotor letak gangguan pada bus LOAD 3B setelah interkoneksi

Generator		$\delta_{awal} (^{\circ})$	$\delta_{selama\ gangguan} (^{\circ})$
AB1	maks	0.734974	1.859491
	min		0.373413
AB2	maks	-0.73497	-0.373413
	min		-1.859491

Sumber : Hasil simulasi

Dari hasil simulasi stabilitas sudut rotor terlihat jika gangguan menyebabkan terjadinya osilasi. Setelah gangguan terjadi sudut rotor pada GEN AB1 dan sudut rotor GEN AB2 bisa kembali ke operasi normal sehingga sistem masih dalam keadaan stabil.

4.4.4 Perbandingan Stabilitas Tegangan Sebelum dan Setelah Interkoneksi

Berdasarkan uraian mengenai stabilitas tegangan di PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2 pada kondisi sebelum dan setelah interkoneksi dapat diperoleh gambaran secara umum tentang stabilitas tegangan pada kedua PLTM tersebut melalui tabel 4.19 berikut:

Tabel 4.19 Perbandingan simulasi stabilitas tegangan pada sistem sebelum dan setelah interkoneksi untuk berbagai letak gangguan

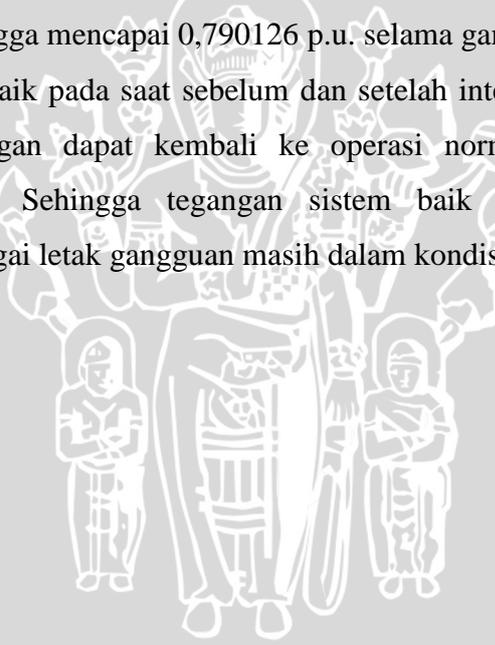
Letak Gangguan (bus)	bus	Sebelum Interkoneksi		sesudah Interkoneksi	
		V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)	V_{drop} (p.u.)	t_{drop} (milidetik)
LOAD 3A	AB1	0.392147	150	0.597525	150
	AB2	-	-	0.597525	150
LOAD 2A	AB1	0.3597	150	0.563567	150

	AB2	-	-	0.563567	150
LOAD 1B	AB1	0.641973	150	0.790126	150
	AB2	-	-	0.790126	150
LOAD 3B	AB1	0.592753	150	0.750573	150
	AB2	-	-	0.750573	150

Sumber : Hasil simulasi

Dari data pada tabel 4.19 terlihat perbedaan antara penurunan tegangan ketika sistem diinterkoneksi dan sebelum diinterkoneksi pada saat terjadi gangguan. Penurunan tegangan pada saat sesudah diinterkoneksi lebih besar dibandingkan dengan penurunan tegangan pada saat sistem sebelum diinterkoneksi. Gangguan yang mengakibatkan penurunan tegangan terbesar ialah gangguan yang terjadi pada salah satu bus yang bersumber dari PLMH Andungbiru 2 dimana sumber ini memiliki kapasitas pembangkit yang jauh lebih kecil jika dibandingkan dengan kapasitas pembangkit dari PLTMH Andungbiru 1. Gangguan yang terjadi pada salah satu bus tersebut, mengakibatkan tegangan bus menurun hingga mencapai 0,790126 p.u. selama gangguan terjadi.

Durasi gangguan baik pada saat sebelum dan setelah interkoneksi ialah selama 150 milidetik dan tegangan dapat kembali ke operasi normal setelah gangguan dihilangkan dari sistem. Sehingga tegangan sistem baik setelah dan sebelum interkoneksi dengan berbagai letak gangguan masih dalam kondisi yang stabil.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan permasalahan yang dibahas serta mengacu pada hasil simulasi dan analisis, maka dapat diambil beberapa kesimpulan, yaitu:

1. Memparalelkan dua buah generator atau lebih menggunakan peralatan sinkronoskop lampu gelap terang merupakan alternatif cara kerja paralel yang bisa dibilang cukup sederhana pelaksanaannya.
2. Stabilitas sistem daya untuk sebelum interkoneksi menunjukkan sistem masih dalam kondisi yang stabil dengan pemberian letak gangguan pada beberapa bus, hal ini dapat dilihat dari kondisi tegangan dan sudut rotornya yang bisa kembali ke operasi normal setelah mengalami gangguan.
3. Stabilitas sistem daya untuk setelah interkoneksi menunjukkan sistem masih dalam kondisi yang stabil dengan pemberian letak gangguan pada beberapa bus, hal ini dapat dilihat dari kondisi tegangan dan sudut rotornya yang bisa kembali ke operasi normal setelah mengalami gangguan.
4. Untuk perbandingan stabilitas tegangan sebelum dan setelah interkoneksi menunjukkan bahwa penurunan tegangan pada kondisi setelah interkoneksi lebih besar daripada kondisi sebelum interkoneksi, namun setelah pemberian gangguan pada kedua sistem dihilangkan, sistem dapat kembali ke operasi normal sehingga kedua sistem masih dalam keadaan stabil.

5.2 Saran

Dengan besarnya total beban yang terpasang sekarang ini, sebenarnya satu pembangkit saja sudah mencukupi untuk menyuplai beban secara keseluruhan, sehingga pembangkit yang lain bisa dijadikan sebagai cadangan jika suatu saat pada generator utama terjadi trouble atau masalah sehingga tidak terjadi pemadaman secara total. Atau bisa juga sebagai cadangan jika ternyata terjadi penambahan beban yang mengharuskan menambah daya pembangkit.

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.
- IEEE Std 446.1995. Nichols, Neil dkk. *IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications*. New York : The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
- Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. New York : McGraw-Hill.
- Patty, O. 1995. *Tenaga Air*. Jakarta: Erlangga.
- Robert, H. Milner & James, H. Malinowski. 1994. *Power System Operation*. New York : McGraw-Hill.
- Siswoyo, 2008. *Smk teknik listrik industri jilid 3 bab 13*. Jakarta : Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Direktorat Jenderal Manajemen Pendidikan Dasar dan Menengah, Departemen Pendidikan Nasional.
- Wibawa, Unggul. 2001. *Sumber Daya Energi Alternatif*. Malang: Kampus Universitas Brawijaya.

LAMPIRAN

Lampiran 1

1. Data generator di PLTMH Andungbiru 1

S	40	kVA
V	380	V
I	61	A
n	1500	rpm
F	50	Hz
$p.f$	0.8	$lagging$
$phase$	3	

Sumber : Survey lapangan

2. Data generator di PLTMH Andungbiru 2

S	16	kVA
V	380	V
I	24.3	A
n	1500	rpm
F	50	Hz
$p.f$	0.8	$lagging$
$phase$	3	

Sumber : Survey lapangan

Lampiran 2 Data panjang pada saluran PLTMH Andungbiru 1 dan PLTMH Andungbiru 2

PLTMH Andungbiru 1		PLTMH Andungbiru 2	
Saluran	Panjang (m)	Saluran	Panjang (m)
Bus GEN AB1 - Bus LOAD 1A	754.42	Bus GEN AB2 - BUS 1	659.49
Bus GEN AB1 - Bus LOAD 2A	744.95	Bus 1 - Bus LOAD 1B	1053.97
Bus GEN AB1 - Bus LOAD 3A	830.38	Bus 1 - Bus LOAD 2B	692.19
Bus GEN AB1 - Bus LOAD 4A	1882.35	Bus 1 - Bus LOAD 3B	724.13
-		Bus 1 - Bus LOAD 4B	549.79

Sumber : Survey lapangan

Lampiran 3 Data karakteristik kabel *single core* 380 Vac, 3 phase, 50 hz

Luas Penampang	Resistansi AC (ohm/km)	Reaktansi AC (ohm/km)	Arus Maksimum (A)
50	0.485	0.094	215
70	0.335	0.09	270
95	0.242	0.087	335
120	0.192	0.084	390
150	0.157	0.084	445
185	0.126	0.084	510
240	0.097	0.081	606
300	0.078	0.08	701
400	0.063	0.079	820
500	0.051	0.078	936

Sumber : Kabel produk 4 besar, Okonite, Pirelli

Lampiran 4 Data dinamik generator

TIPIKAL	GEN AB1	GEN AB2
kVA	40	16
V	380	380
H	6	6
D	0	0
Xd	1.9	0.76
Xq	1.8	0.72
Xd'	0.28	0.112
Xq'	0.41	0.164
Xd''	0.12	0.046
Xq''	0.12	0.046
Tdo'	4.8	4.8
Tdo''	0.04	0.035
Tqo'	0.45	0.45
Tqo''	0.06	0.06
Xl	0.1	0.038



Lampiran 5 Perhitungan impedansi saluran PLTMH Andungbiru 1

Dari	ke	Panjang (m)	A (mm ²)	R (ohm/km)	X (ohm/km)	R (ohm)	X (ohm)	R (p.u.)	X (p.u.)
Bus GEN AB1	Bus LOAD 1A	754.42	240	0.097	0.081	0.073179	0.061108	0.506778	0.423186
Bus GEN AB2	Bus LOAD 2A	744.95	240	0.097	0.081	0.072260	0.060341	0.444514	0.371192
Bus GEN AB3	Bus LOAD 3A	830.38	240	0.097	0.081	0.080547	0.067261	0.501888	0.419102
Bus GEN AB4	Bus LOAD 4A	1882.35	240	0.097	0.081	0.182588	0.152470	1.208545	1.009197

Sumber : Hasil perhitungan

Lampiran 6 Perhitungan impedansi saluran PLTMH Andungbiru 2

Dari	ke	Panjang (m)	A (mm ²)	R (ohm/km)	X (ohm/km)	R (ohm)	X (ohm)	R (p.u.)	X (p.u.)
Bus GEN AB1	Bus 1	659.49	240	0.097	0.081	0.063971	0.053419	0.443009	0.369935
Bus 1	Bus LOAD 1A	1053.97	240	0.097	0.081	0.102235	0.085372	0.707999	0.423186
Bus 1	Bus LOAD 2A	692.19	240	0.097	0.081	0.067142	0.056067	0.464975	0.388278
Bus 1	Bus LOAD 3A	724.13	240	0.097	0.081	0.070241	0.058655	0.501888	0.406195
Bus 1	Bus LOAD 4A	549.79	240	0.097	0.081	0.053330	0.044533	1.208545	0.3084

Sumber : Hasil perhitungan