



**ANALISIS NILAI *CRITICAL CLEARING TIME* SISTEM MULTI-MESIN
DENGAN KONSEP *ONE MACHINE INFINITE BUS* MENGGUNAKAN
METODE KRITERIA SAMA LUAS DAN RUNGE-KUTTA ORDE 4**

SKRIPSI

Oleh

Febriana Ika Listya Handini

NIM 141910201090

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**



**ANALISIS NILAI *CRITICAL CLEARING TIME* SISTEM MULTI-MESIN
DENGAN KONSEP *ONE MACHINE INFINITE BUS* MENGGUNAKAN
METODE KRITERIA SAMA LUAS DAN RUNGE-KUTTA ORDE 4**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Elektro (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

Febriana Ika Listya Handini

NIM 141910201090

**PROGRAM STUDI STRATA 1 TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2018**

PERSEMBAHAN

Puji syukur tercurahkan kepada Allah SWT yang telah memberikan limpah rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis menyadari bahwa dalam pengerjaan skripsi ini banyak semangat yang didapatkan dari banyak pihak. Untuk itu persembahan ini penulis berikan kepada :

1. Allah SWT, Tuhan yang bergantung kepada-Nya segala sesuatu.
2. Nabi Muhammad SAW, utusan Allah SWT sebagai pedoman bagi manusia.
3. Ayahanda Handoyo dan Ibunda Sulistyowati tercinta, yang selalu mendoakan, mengarahkan, serta memberikan dukungan penuh dengan segala perhatiannya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar.
4. Dosen Pembimbing Utama Bapak Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T. serta Dosen Pembimbing Anggota Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T. atas kesabaran dan keikhlasan dalam membimbing saya menyelesaikan skripsi ini.
5. Seluruh dosen Teknik Elektro Universitas Jember yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan dan bimbingan selama mengikuti pendidikan di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.
6. Adikku Rosalina Dwi Kusuma Dewi yang telah memberi semangat untuk menyelesaikan skripsi ini.
7. Seluruh saudara KETEK UJ 2014 yang telah memberikan dukungan dan doanya.
8. Sahabat seperjuangan tercinta Hani Sofiatus S, Fitria Rizky Amalia, Evhi Nur Imamah dan Ramadhaniar Eka yang telah memberikan semangat serta perhatian yang luar biasa.
9. Almamater Tercinta Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTTO

“Karena sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan”
(Q.S. Al-Insyirah ayat 5)

“*So many of our dreams at first seem impossible, then they seem improbable, and then when we summon the will, they soon become inevitable*”
(Christopher Reeve)

“*Whenever I feel weak, I'll remember those who make me strong. And whenever I start to doubt myself, I'll remember those who believe in me*”
(Anonim)

“Ketika masih muda, teruslah bermimpi setinggi mungkin dan jangan pernah menyerah Jika menemukan rintangan, hal yang perlu kau lakukan adalah melewatinya, maka rintangan itu akan menjadi jembatan”
(Dream High)

“Mereka mengatakan bahwa semua ini hanyalah bagian dari proses. Kalau kau ingin sukses, buatlah perangkat yang bernama kegagalan”
(Stray Kids)

“Jangan pernah berfikir untuk menyerah atas apa yang tengah kamu jalani saat ini, ingatlah bagaimana usaha dan perjuanganmu untuk bisa memulainya”
(Febriana Ika L. H.)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Febriana Ika Listya Handini

NIM : 141910201090

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul ”Analisis Nilai *Critical Clearing Time* Sistem Multi-mesin dengan Konsep *One Machine Infinite Bus* Menggunakan Metode Runge-Kutta Orde 4” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi manapun dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 10 Juli 2018

Yang menyatakan,

Febriana Ika Listya Handini
NIM 141910201090

SKRIPSI

**ANALISIS NILAI *CRITICAL CLEARING TIME* SISTEM MULTI-MESIN
DENGAN KONSEP *ONE MACHINE INFINITE BUS* MENGGUNAKAN
METODE KRITERIA SAMA LUAS DAN RUNGE-KUTTA ORDE 4**

Oleh

Febriana Ika Listya Handini

NIM 141910201090

Pembimbing :

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “Analisis Nilai *Critical Clearing Time* Sistem Multi-mesin dengan Konsep *One Machine Infinite Bus* Menggunakan Metode Kriteria Sama Luas dan Runge-Kutta Orde 4” karya Febriana Ika Listya Handini telah diuji dan disahkan pada :

Hari : Kamis

Tanggal : 12 Juli 2018

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim penguji,

Ketua,

Anggota I,

Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.
NIP 197106141997021001

Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.
NIP 197104022003121001

Anggota II,

Anggota III,

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP 197004041996011001

Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M.
NIP 196312011994021002

Mengesahkan
Dekan,

Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M.
NIP 196612151995032001

RINGKASAN

Analisis Nilai *Critical Clearing Time* Sistem Multi-mesin dengan Konsep *One Machine Infinite Bus* Menggunakan Metode Kriteria Sama Luas dan Runge-Kutta Orde 4; Febriana Ika Listya Handini; 141910201090; 2018; 80 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Dengan terus meningkatnya kebutuhan listrik, telah dilakukan berbagai upaya guna meningkatkan dan memaksimalkan produksi listrik. Upaya tersebut antara lain membangun pembangkit baru dan penggunaan bahan energi terbarukan. Selain kedua hal tersebut, perlu juga memperhatikan aspek penting dalam pembangkitan listrik yaitu kestabilan sistem tenaga listrik itu sendiri. Menjaga stabilitas sistem tenaga listrik sangat penting karena apabila suatu sistem tenaga listrik tidak stabil, dapat menyebabkan terganggunya proses pembangkitan, transmisi dan distribusi listrik.

Stabilitas sistem tenaga merupakan kemampuan suatu sistem tenaga untuk kembali ke keadaan awal atau keadaan stabil setelah mengalami suatu gangguan. Stabilitas sistem tenaga terdiri dari stabilitas *steady state*, stabilitas dinamik dan stabilitas transien. Dari ketiga stabilitas sistem tenaga tersebut, stabilitas transien merupakan kondisi yang paling berbahaya bagi sistem tenaga. Hal ini dikarenakan kondisi transien adalah saat sistem tenaga mengalami suatu gangguan atau perubahan besar dalam waktu singkat yang memungkinkan sistem kehilangan kestabilannya apabila gangguan tidak dihilangkan pada waktu yang tepat. Oleh karena itu, suatu sistem diproteksi dengan *relay* yang akan mendeteksi adanya gangguan dan men-*trigger circuit breaker* untuk memutus gangguan dari sistem. *Setting* waktu pada *relay* harus tepat yaitu berdasarkan *critical clearing time* atau waktu pemutus kritis agar sistem dapat mempertahankan kestabilannya.

Penelitian ini membahas tentang perhitungan *critical clearing time* suatu sistem tenaga menggunakan konsep *one machine infinite bus*. Konsep *one machine infinite bus* mempermudah proses perhitungan *critical clearing time* karena akan menghasilkan nilai *critical clearing time* untuk keseluruhan sistem

bukan hanya pada salah satu generator. Perhitungan *critical clearing angle* dilakukan menggunakan Metode Kriteria Sama Luas sedangkan perhitungan *critical clearing time* menggunakan Metode Runge-Kutta Orde 4.

Simulasi gangguan dilakukan pada dua titik yaitu gangguan A di dekat Bus 9 pada saluran 6-9 dan gangguan B di dekat bus 9 pada saluran 8-9. Kondisi sebelum dan selama gangguan kedua kondisi A dan B adalah sama karena kedua gangguan terletak di dekat bus 9. Kondisi setelah gangguan pada gangguan A dan B berbeda karena untuk memutus gangguan dari sistem dilakukan dengan melepas saluran yang berbeda. Dari penelitian ini diperoleh hasil nilai *critical clearing angle* dan *critical clearing time* gangguan A masing - masing 96,18 derajat dan 0,346 detik. Pada gangguan B nilai *critical clearing angle* dan *critical clearing time* masing – masing adalah 86,5217 derajat dan 0,328 detik.

Salah satu indikator yang menunjukkan suatu sistem masih dalam keadaan stabil adalah apabila terjadi ayunan sudut rotor terhadap waktu setelah dilakukan pemutusan gangguan dari sistem. Pada pengujian nilai *critical clearing time*, saat dilakukan pemutusan dengan waktu kurang dari atau sama dengan *critical clearing time*, terjadi ayunan sudut rotor terhadap waktu. Sedangkan ketika melakukan pemutusan dengan waktu lebih dari *critical clearing time*, tidak terjadi ayunan sudut rotor terhadap waktu dimana nilai sudut rotor terus naik terhadap waktu. Sehingga dapat disimpulkan bahwa apabila waktu pemutusan gangguan kurang dari atau sama dengan *critical clearing time* maka sistem masih dapat mempertahankan kestabilannya. Sedangkan apabila waktu pemutusan gangguan lebih dari *critical clearing time* maka sistem akan kehilangan kestabilannya karena rotor lepas sinkron.

PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang maha kuasa atas segalanya, karena dengan ridho, hidayah dan petunjuk-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Nilai *Critical Clearing Time* Sistem Multi-mesin dengan Konsep *One Machine Infinite Bus* Menggunakan Metode Kriteria Sama Luas dan Runge-Kutta Orde 4”. Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan berbagai pihak yang turut memberikan bantuan berupa motivasi, inspirasi, bimbingan, doa, fasilitas dan dukungan lainnya yang membantu memperlancar pengerjaan skripsi ini.

Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada.

1. Allah SWT yang telah melimpahkan rezeki, rahmat, hidayah dan karunia serta kasih sayang-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
2. Nabi besar Muhammad SAW, yang telah menjadi suri tauladan bagi seluruh umat.
3. Ibu Dr. Ir. Entin Hidayah, M.U.M., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
4. Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Jember.
5. Bapak Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama serta Bapak Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang telah meluangkan waktu, pikiran, dan perhatian dalam penulisan skripsi ini.
6. Bapak Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T. dan Bapak Prof. Dr. Ir. Bambang Sujanarko, M.M. selaku dosen penguji yang sudah memberikan saran untuk memperbaiki tugas akhir ini.
7. Bapak Dodi Setiabudi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama menjadi mahasiswa.
8. Ayahanda Handoyo dan ibunda Sulistyowati yang selalu memberikan motivasi, nasehat, cinta, perhatian, dan kasih sayang serta doa yang tak terhingga.

9. Sahabat seperjuangan tercinta Hani Sofiatius S, Fitria Rizky Amalia, Evhi Nur Imamah dan Ramadhaniar Eka yang telah menemani dan memberikan motivasi serta semangat yang sangat luar biasa.
10. Sahabat tercinta Sita, Irmu, Shol, Nurul serta Sahabat XB tercinta Silvira, Helmi, Riski yang telah memberikan semangat yang luar biasa.
11. Sahabat KKN 22 Elvi, Linda, Dira, Gege, Riris, Sastra, Mas Dhika, Mas Udin dan Ismail.
12. Saudara seperjuangan KETEK UJ 2014 yang telah memberikan motivasi dan semangat dalam perjalanan di bangku kuliah.
13. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam mengembangkan ilmu pengetahuan khususnya untuk disiplin ilmu teknik elektro. Kritik dan saran yang membangun diharapkan terus mengalir untuk lebih menyempurnakan skripsi ini dan dapat dikembangkan untuk penelitian selanjutnya.

Jember, 10 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBING	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terkait	5
2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	6
2.3 Analisis Stabilitas Transien	8
2.4 Sistem Multi-mesin dan <i>One Machine Infinite Bus</i>	11
2.5 Persamaan Ayunan	12
2.6 Reduksi Matriks Admitansi.....	13
2.7 Perhitungan Daya Mekanik, Elektrik dan Percepatan.....	14
2.8 Reduksi Sistem Multi-mesin Menjadi OMIB	15
2.9 Metode Kriteria Sama Luas	17

2.10 Metode Runge-Kutta Orde 4	18
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	20
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	20
3.2 Alat dan Bahan	20
3.3 Data Sistem Tenaga IEEE 9 Bus Test System	20
3.4 Tahapan Penelitian	22
3.5 Metode Simulasi	23
3.6 Diagram Alir (Flowchart)	26
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Letak dan Kondisi Simulasi Gangguan	29
4.2 Aliran Daya IEEE 9 Bus Test System	31
4.3 Hasil Perhitungan Matriks Admitansi	32
4.3.1 Matriks Admitansi Sebelum Gangguan	32
4.3.2 Matriks Admitansi Selama Gangguan	34
4.3.3 Matriks Admitansi Setelah Gangguan	35
4.4 Hasil Perhitungan Daya	39
4.4.1 Hasil Perhitungan Daya Sebelum Gangguan	39
4.4.2 Hasil Perhitungan Daya Selama Gangguan	40
4.4.3 Hasil Perhitungan Daya Setelah Gangguan	41
4.4.3.1 Daya Setelah Gangguan Kondisi Gangguan A	41
4.4.3.2 Daya Setelah Gangguan Kondisi Gangguan B	42
4.5 Reduksi Sistem Multi-mesin Menjadi One Machine Infinite Bus ..	42
4.6 Hasil Perhitungan CCA dan CCT	46
4.7 Kurva Ayunan Sudut Rotor	48
4.7.1 Kurva Ayunan Sudut Rotor pada Gangguan A	48
4.7.1.1 Waktu Pemutusan 0,246 detik	48
4.7.1.2 Waktu Pemutusan 0,345 detik	49
4.7.1.3 Waktu Pemutusan 0,346 detik	50
4.7.1.4 Waktu Pemutusan 0,347 detik	51
4.7.1.5 Waktu Pemutusan 0,446 detik	52
4.7.2 Kurva Ayunan Sudut Rotor pada Gangguan B	54

4.7.2.1 Waktu Pemutusan 0,228 detik	54
4.7.2.2 Waktu Pemutusan 0,327 detik	55
4.7.2.3 Waktu Pemutusan 0,328 detik	56
4.7.2.4 Waktu Pemutusan 0,329 detik	57
4.7.2.5 Waktu Pemutusan 0,428 detik	58
4.8 Parameter yang Mempengaruhi Nilai <i>Critical Clearing Time</i>	59
BAB 5. PENUTUP	64
5.1 Kesimpulan	64
5.2 Saran	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	68

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Data Pembangkit <i>IEEE 9 Bus Test System</i>	20
3.2 Data Saluran <i>IEEE 9 Bus Test System</i>	21
3.3 Data Beban <i>IEEE 9 Bus Test System</i>	21
4.1 Kondisi gangguan dalam simulasi	30
4.2 Data tegangan bus, pembangkitan dan beban	32
4.3 Daya mekanik, daya elektrik sebelum gangguan	39
4.4 Daya mekanik, daya elektrik dan daya percepatan selama gangguan	40
4.5 Daya setelah gangguan kondisi Gangguan A	41
4.6 Daya setelah gangguan kondisi Gangguan B	42
4.7 Percepatan generator saat gangguan	43
4.8 Parameter sistem OMIB	45
4.9 Parameter perhitungan sudut pemutus kritis	46
4.10 Sudut dan waktu pemutus kritis	47
4.11 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,246 detik kondisi A	49
4.12 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,345 detik kondisi A	50
4.13 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,346 detik kondisi A	50
4.14 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,347 detik kondisi A	51
4.15 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,446 detik kondisi A	52
4.16 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,228 detik kondisi B	55
4.17 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,327 detik kondisi B	56
4.18 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,328 detik kondisi B	57
4.19 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,329 detik kondisi B	58
4.20 Nilai sudut dan omega pada waktu pemutus 0,428 detik kondisi B	59
4.21 Perbandingan daya setelah gangguan diputuskan	60
4.22 Daya elektrik sistem OMIB	61
4.23 Perbandingan kurva ayunan kondisi A dan kondisi B	62

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Diagram <i>Single line</i> SIMB	11
2.2 Grafik sudut daya yang menunjukkan <i>critical clearing time</i>	17
3.1 <i>Single Line</i> Sistem Tenaga IEEE 9 Bus Test System	22
3.2 <i>Flowchart</i> Penelitian	26
3.3 <i>Flowchart</i> Reduksi Sistem Multi-mesin Menjadi OMIB	28
4.1 Letak gangguan dalam simulasi penelitian	29
4.2 Aliran daya IEEE 9 Bus Test System pada Power World Simulator	31
4.3 Kurva ayunan waktu pemutus 0,246 detik kondisi A	48
4.4 Kurva ayunan waktu pemutus 0,345 detik kondisi A	49
4.5 Kurva ayunan waktu pemutus 0,346 detik kondisi A	51
4.6 Kurva ayunan waktu pemutus 0,347 detik kondisi A	52
4.7 Kurva ayunan waktu pemutus 0,446 detik kondisi A	53
4.8 Kurva ayunan waktu pemutus 0,228 detik kondisi B	54
4.9 Kurva ayunan waktu pemutus 0,327 detik kondisi B	55
4.10 Kurva ayunan waktu pemutus 0,328 detik kondisi B	56
4.11 Kurva ayunan waktu pemutus 0,329 detik kondisi B	57
4.12 Kurva ayunan waktu pemutus 0,428 detik kondisi B	58

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran A. <i>Listing Program</i> Matriks Admitansi	68
Lampiran B. <i>Listing Program</i> CCA dan CCT	72
Lampiran C. Aliran Daya IEEE 9 <i>Bus Test System</i>	76
Lampiran D. Data IEEE 9 <i>Bus Test System</i>	79

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan baik gangguan kecil maupun gangguan besar (H. Milner Robert, 1994). Menjaga stabilitas sistem tenaga listrik sangat penting karena apabila suatu sistem tenaga listrik tidak stabil, dapat menyebabkan terganggunya proses pembangkitan, transmisi dan distribusi tenaga listrik. Penyebab utama terganggunya kestabilan suatu sistem tenaga listrik adalah ketidakmampuan sistem tenaga untuk memenuhi permintaan daya reaktif yaitu karena susut tegangan saat daya reaktif dan aktif mengalir melalui reaktansi induktif jaringan transmisi, jaringan transmisi yang terputus dan gangguan hubung singkat. Ketika gangguan besar terjadi pada suatu sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi, maka keamanan sistem tenaga harus diperiksa (Kamdan, 2014).

Terjadinya gangguan besar pada sistem tenaga seperti gangguan hubung singkat dapat mengganggu stabilitas transien sistem. Untuk menghindari kerusakan pada sistem tenaga listrik akibat adanya keadaan transien, maka digunakan *relay* untuk mendeteksi adanya gangguan dan men-*trigger Circuit Breaker (CB)* untuk memutus gangguan dari jaringan (Luthfan, 2014). *Setting* waktu pada *relay* haruslah tepat yaitu kurang dari atau sama dengan *Critical Clearing Time (CCT)* atau waktu pemutus kritis. *Critical clearing time* merupakan waktu yang diizinkan untuk memutuskan gangguan sehingga kemungkinan sistem kembali dalam keadaan stabil masih ada. Apabila *CB* dibuka setelah *CCT*, hal ini akan membahayakan sistem karena sistem akan kehilangan kestabilan dan lepas sinkron.

Berbagai cara untuk menentukan *CCT* telah dilakukan dalam berbagai penelitian. Mulai dari metode konvensional yang membutuhkan waktu perhitungan lebih lama hingga melakukan prediksi nilai *critical clearing time* menggunakan *Neural Network* seperti pada jurnal yang penulis jadikan acuan dalam penelitian ini. Pada sistem multi-mesin perhitungan *CCT* lebih kompleks dari *One Machine Infinite Bus (OMIB)*. Akan tetapi untuk mempermudah perhitungan *CCT* pada

sistem multi-mesin, dapat dilakukan dengan menggunakan konsep OMIB. Dengan menggunakan konsep OMIB, maka perhitungan CCT dihitung untuk keseluruhan sistem tenaga tanpa harus menghitung CCT pada masing – masing generator. Berdasarkan permasalahan tersebut, penulis akan melakukan penelitian untuk menghitung dan menganalisis nilai *critical clearing time* suatu sistem tenaga multi-mesin. Data sistem tenaga listrik yang digunakan dalam penelitian ini adalah IEEE 9 Bus Test System.

Pada penelitian ini akan dilakukan estimasi *Critical Clearing Time* (CCT) atau waktu pemutus kritis untuk stabilitas transien sistem tenaga menggunakan *software* MATLAB. Metode Kriteria Sama Luas digunakan dalam perhitungan *critical clearing angle* sedangkan *critical clearing time* dihitung menggunakan Metode Runge-Kutta Orde 4. Penentuan *critical clearing time* dilakukan dengan simulasi komputer karena meliputi banyak persamaan dimana persamaan tersebut akan sangat sulit diselesaikan secara manual, juga untuk meminimalisir terjadinya kesalahan perhitungan dan ketelitian perhitungan yang lebih baik. Penyelesaian *critical clearing time* pada sistem multi-mesin dengan metode konvensional akan membutuhkan waktu yang lebih lama serta perhitungan yang lebih banyak (Irrine, 2012). Oleh karena itu pada penelitian ini penyelesaian *critical clearing time* dilakukan dengan konsep *One Machine Infinite Bus* (OMIB) berdasarkan jurnal acuan. Generator pada sistem tenaga akan dikelompokkan dalam mesin kritis dan mesin tidak kritis berdasarkan percepatannya saat terjadi gangguan hubung singkat. Kemudian generator dengan kategori mesin kritis dan mesin tidak kritis tersebut dikombinasikan sehingga menjadi sistem OMIB. Gangguan yang disimulasikan pada penelitian ini adalah gangguan tiga fasa seimbang ke tanah. Dengan dilaksanakannya penelitian ini, diharapkan dapat mendukung pengembangan tentang studi stabilitas sistem tenaga listrik khususnya tentang *critical clearing time* dalam stabilitas transien.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang dikemukakan, maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

- a. Bagaimanakah cara mereduksi sistem multi-mesin menjadi OMIB untuk perhitungan CCT dalam stabilitas transien sistem tenaga?
- b. Berapakah *critical clearing time* (CCT) dari sistem tenaga saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah?
- c. Parameter atau variabel apa saja yang mempengaruhi nilai CCT?

1.3 Batasan Masalah

Untuk memperjelas, menyederhanakan dan menghindari meluasnya masalah maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

- a. Penelitian ini hanya dilakukan pada data sistem tenaga multi-mesin IEEE 9 *Bus Test System*.
- b. Estimasi CCT dilakukan dengan mereduksi sistem multi-mesin menjadi *One Machine Infinite Bus*.
- c. Estimasi *critical clearing angle* dengan Metode Kriteria Luas Sama dan *critical clearing time* dengan Metode Runge-Kutta orde 4 dilakukan menggunakan *software* MATLAB.
- d. Gangguan yang diberikan pada simulasi adalah gangguan tiga fasa ke tanah yang terjadi pada dua kondisi yakni gangguan A pada Bus 9 saluran antara bus 6-9 dan gangguan B pada Bus 9 saluran antara bus 8-9.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang akan dicapai dalam melaksanakan penelitian ini antara lain:

- a. Mempelajari stabilitas sistem tenaga listrik menggunakan data IEEE 9 *Bus Test System*.
- b. Menentukan *critical clearing time* saat terjadi gangguan tiga fasa ke tanah pada sistem tenaga.
- c. Mengetahui parameter atau variabel yang mempengaruhi nilai waktu pemutus kritis.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang ingin dicapai dalam melaksanakan penelitian ini antara lain:

- a. Mendukung pengembangan tentang studi stabilitas sistem tenaga listrik khususnya tentang *critical clearing time* dalam stabilitas transien.
- b. Dapat melakukan estimasi *critical clearing time* yang dapat dijadikan acuan dalam *setting relay* proteksi.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan tentang pengumpulan pendapat atau teori yang telah ada yang berkaitan dengan masalah yang dibahas dan menentukan teori – teori sebagai dasar analisis, dapat dijelaskan sebagai berikut:

2.1 Penelitian Terkait

Berikut merupakan beberapa penelitian terkait yang merupakan tinjauan penelitian penulis.

- a. *Prediction of Critical Clearing Time of Java-Bali 500 kV Power System Under Multiple Bus Load Changes Using Neural Network Based Transient Stability Model*, oleh Irrine Budi Sulistiawati Tahun 2012

Penelitian terkait ini memprediksi *critical clearing time* atau waktu pemutus kritis menggunakan *neural network*. Pada penelitian ini waktu pemutus kritis dihitung menggunakan konsep *One Machine Infinite Bus* (OMIB). Nilai waktu pemutus kritis hasil perhitungan digunakan sebagai target pada *neural network* dan perubahan beban sebagai input. Dari penelitian ini diperoleh diperoleh hasil prediksi nilai CCT dengan *error* terkecil 0,0016% dan *error* terbesar 0,0419% jika dibandingkan dengan nilai CCT hasil perhitungan (Irrine, 2012).

- b. *Further Developments of The Equal-Area Criterion for Multimachine Power Systems*, oleh M.H. Haque Tahun 1993

Penelitian terkait ini menghitung nilai *critical clearing time* atau waktu pemutus kritis dengan metode Kriteria Sama Luas. Metode penelitian ini mengidentifikasi mesin kritis dengan mengamati variasi daya percepatan mesin yang sangat terganggu oleh gangguan. Mesin kritis dianggap sebagai salah satu yang memiliki kecenderungan untuk memulai ketidakstabilan pada sistem. Pada penelitian ini tidak mengharuskan menghitung kestabilan mesin tidak kritis. jadi hanya mesin yang tergolong kritis yang dimasukkan dalam perhitungan *critical clearing time*.

Pada penelitian ini, diperoleh nilai *critical clearing time* pada tiga sistem tenaga. Pada *7-machine CIGRE System* nilai CCT berkisar antara 0,340 hingga 0,519 detik. Pada *The 20-machine IEEE Test System* nilai CCT berkisar antara 0,180 hingga 0,523 detik. Dan pada *The 17-machine Reduced Lowa System* nilai CCT berkisar antara 0,185 hingga 0,341 detik (M.H. Haque, 1995).

2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami suatu gangguan baik gangguan kecil maupun gangguan besar. Masalah stabilitas biasanya diklasifikasikan menjadi tiga tipe (H. Milner Robert, 1994), yaitu:

a. Stabilitas *Steady State*

Stabilitas *steady state* atau stabilitas mantap merupakan kemampuan sistem untuk tetap stabil ketika terjadi gangguan kecil yang bersifat gradual, yaitu terjadi di sekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap. Sistem tenaga mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identik dengan kondisi sebelum terjadi gangguan setelah sistem mengalami gangguan kecil. Kriteria untuk keadaan *steady state* dicapai apabila:

$$\frac{dp}{d\delta} > 0$$

Yang artinya koefisien sinkronisasi harus positif. Untuk menyederhanakan perhitungan dan memperbesar faktor keamanan, maka diambil harga:

$$\frac{dp}{d\delta} = 0$$

b. Stabilitas Dinamik

Stabilitas dinamik merupakan kemampuan sistem kembali ke titik keseimbangan setelah terjadi gangguan relatif kecil secara tiba – tiba dalam rentang waktu yang lama.

c. Stabilitas Transien

Stabilitas transien atau stabilitas peralihan merupakan kemampuan sistem mencapai titik kesimbangan setelah mengalami gangguan besar yang terjadi secara tiba – tiba dimana gangguan yang terjadi diatas kemampuan sistem.

Menurut P. Kundur (1994), stabilitas sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi stabilitas tegangan, stabilitas sudut rotor dan stabilitas frekuensi.

a. Stabilitas tegangan

Stabilitas tegangan merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk tetap mempertahankan nilai tegangan pada kondisi operasi normal pada setiap bus setelah terjadi gangguan kecil atau gangguan besar dalam jangka pendek atau jangka panjang. Kestabilan tegangan gangguan besar adalah kemampuan sistem untuk mempertahankan nilai tegangan pada kondisi normal setelah terjadinya gangguan besar seperti *generator outage* atau terjadi hubung singkat. Kemampuan sistem dapat dilihat dari respon interaksi dari pengatur tegangan seperti *tap changer* trafo dan sistem proteksi (M. Maulana, 2016).

b. Stabilitas sudut rotor

Stabilitas sudut rotor merupakan kemampuan dari interkoneksi mesin sinkron suatu sistem tenaga untuk tetap dalam kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan kecil atau gangguan besar (P. Kundur, 1994). Kestabilan sudut rotor gangguan kecil adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan kecil seperti perubahan-perubahan kecil yang terus menerus pada daya beban atau daya pembangkitan sedangkan kestabilan sudut rotor gangguan besar adalah kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronnya setelah terjadinya gangguan besar seperti *generator outage* atau hubung singkat (M. Maulana, 2016).

c. Stabilitas frekuensi

Stabilitas frekuensi merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga untuk tetap mempertahankan nilai frekuensi fundamental atau nilai frekuensi pada kondisi operasi normal setelah terjadi gangguan. Gangguan perubahan frekuensi biasanya dikarenakan tidak seimbangnya antara daya pembangkitan dengan daya beban. Kemampuan sistem dapat dilihat dari respon dari pengatur frekuensi yaitu *governor* (M. Maulana, 2016).

2.3 Analisis Stabilitas Transien

Analisis stabilitas transien merupakan ilmu yang mempelajari tentang gejala – gejala peralihan yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik. Gejala peralihan tersebut sangat memberikan efek luar biasa pada sistem yang menyebabkan goyangnya kestabilan sistem dalam suatu kelistrikan industri yang ada di suatu pabrik atau jaringan (L. While Alan, 2004). Gangguan yang mempengaruhi stabilitas transien merupakan gangguan besar yang dapat disebabkan oleh perubahan pada sisi beban ataupun pembangkit secara tiba – tiba, gangguan pada jaringan transmisi yaitu hubung singkat atau pemutusan jaringan oleh *circuit breaker*.

Batas kestabilan transien adalah harga maksimum daya yang dapat disalurkan dari suatu sistem ke sistem yang lain, sedemikian rupa sehingga bila terjadi gangguan sementara atau yang menetap sistem itu tetap stabil (Sulasno, 1993). Menurut Sulasno (1993), untuk mengetahui batas kestabilan transien, perlu diketahui adanya faktor – faktor yang menyebabkan keadaan transien atau yang mempengaruhi kestabilan antara lain:

a. Penambahan beban secara tiba – tiba

Penambahan beban pada sistem tenaga dapat menyebabkan timbulnya gangguan transien apabila:

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

b. Pengoperasian penghubung (*switching*)

Untuk pengoperasian penghubung dapat diselidiki dengan menggunakan kriteria sama luas. Pada kasus pengoperasian penghubung, digunakan dua kurva sudut daya dengan pertimbangan pertimbangan sebagai berikut:

- Kurva sudut daya untuk kondisi awal.
- Kurva sudut daya untuk kondisi setelah pengoperasian penghubung.

c. Gangguan hubung singkat

Dari beberapa jenis hubung singkat yang sering terjadi adalah gangguan satu saluran ke tanah. Berikut jenis gangguan hubung singkat yang terjadi pada sistem tenaga:

- Hubung singkat satu fasa ke tanah

Pada gangguan hubung singkat satu saluran fasa ke tanah, jala – jala urutan positif, negatif dan nol terhubung seri. Jika dipandang dari jepitan jala – jala urutan positif pada titik gangguan, maka kedua jala – jala urutan negatif dan nol terhubung seri. Dengan demikian kedua impedansi Z_2 dan Z_0 yang dihubungkan paralel pada jala – jala urutan positif di titik gangguan dapat dipandang sebagai impedansi gangguan.

$$Z_F = Z_2 + Z_0 \quad (2.1)$$

Dengan:

Z_F = impedansi gangguan

Z_2 = impedansi urutan negatif

Z_0 = impedansi urutan nol

- Hubung singkat dua saluran fasa

Pada hubung singkat antar saluran tanpa ada jala – jala urutan positif dengan negatif, dan keduanya terhubung paralel. Disamping dari titik gangguan pada jala – jala urutan positif, jala – jala urutan negatif itu seolah – oleh impedansi gangguan.

$$Z_F = Z_0 \quad (2.2)$$

- Hubung singkat dua saluran fasa ke tanah

pada hubung singkat dua saluran ke tanah, ketiga jala – jala urutan terhubung paralel. Dipandang dari titik gangguan pada jala – jala urutan positif, jala – jala urutan negatif dan urutan nol yang terhubung paralel membentuk impedansi saluran.

$$Z_F = Z_2 \quad (2.3)$$

- Hubung singkat tiga saluran fasa

Sedangkan untuk gangguan hubung singkat tiga fasa $Z_F = 0$, karena pada gangguan ini arus gangguan hanya dipengaruhi oleh Z_1 . Jadi besarnya pengaruh impedansi gangguan Z_F pada kestabilan sistem tergantung pada jenis

gangguannya. Bila dipandang bahwa jala – jala urutan negatif dan urutan nol sebagai gangguan maka besar impedansi gangguan itu, yang paling berbahaya adalah hubung singkat tiga fasa.

Dari gangguan – gangguan yang telah dijelaskan, gangguan fasa tunggal dari saluran ke tanah adalah yang paling sering terjadi sedangkan gangguan tiga fasa adalah yang paling jarang. Untuk keandalan yang sempurna, suatu sistem harus dirancang untuk kestabilan peralihan terhadap gangguan tiga fasa pada lokasi yang menimbulkan pengaruh terburuk (William D. Stevenson, 2005).

Menurut Sulasno (1993), faktor yang dapat dijadikan petunjuk bagi kestabilan sistem tenaga antara lain:

a. Tegangan Sistem

Dengan meningkatnya tegangan pada rel – rel gardu daya maksimum stabilitas mantap akan meningkat, kurva daya akan naik apabila daya maksimum dinaikkan. Peningkatan tegangan dapat dilakukan dengan mengatur arus eksitasi generator pembangkit dan menggunakan kapasitor seri untuk mengkompensir turunnya tegangan yang disebabkan reaktansi induktif saluran. Peningkatan tegangan sistem pada sisi kirim dapat dilakukan dengan memperbesar konstanta inersia H, yaitu memperbesar dimensi generator. Peningkatan tegangan sistem pada sisi terima dilakukan dengan pengaturan *tap changer* pada transformator.

b. Reaktansi saluran

Dengan memperkecil reaktansi saluran akan menaikkan daya maksimum yang dapat dilakukan dengan cara:

- Memperbesar diameter kawat transmisi pada sirkuit tunggal, sehingga reaktansi saluran menjadi lebih kecil.
- Menambah sirkuit saluran

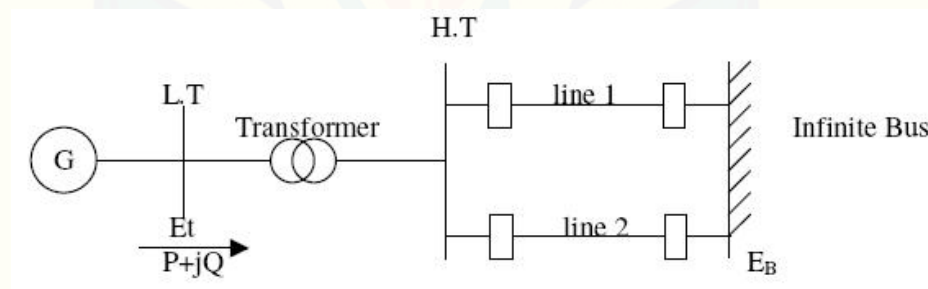
Dengan penambahan sirkuit saluran, misalnya semula hanya satu sirkuit ditingkatkan menjadi sirkuit ganda, maka akan menjadikan reaktansi mengecil sebagaimana halnya dua reaktansi yang dihubungkan paralel. Cara ini jauh lebih baik disbanding cara yang terdahulu, karena dengan adanya gangguan hubung singkat atau saluran terbuka (terputus) maka masih dapat menyuplai daya melalui sirkuit yang tidak mengalami gangguan.

Cara lain untuk meningkatkan stabilitas sistem tenaga dapat dilakukan dengan memperpendek waktu pemutusan dengan menggunakan *relay* dan pemutus (*auto recloser, circuit breaker*) yang berkecepatan tinggi sehingga waktu pemutusannya lebih singkat.

2.4 Sistem Multi-mesin dan *One Machine Infinite Bus*

Sistem multi-mesin merupakan interkoneksi dari beberapa pembangkit membentuk suatu sistem yang saling terintegrasi yang menyebabkan setiap pembangkit saling mempengaruhi satu sama lain (Suharno, D. N., 1999). Apabila terjadi perubahan pada salah satu pembangkit atau beban, maka kemungkinan besar akan mempengaruhi keadaan sistem. Misalnya dalam stabilitas sistem tenaga, ketika terjadi gangguan pada suatu titik atau salah satu pembangkit, hal ini dapat mempengaruhi kestabilan sistem secara keseluruhan.

Sistem *Single Machine Infinite Bus* (SMIB) atau *One Machine Infinite Bus* (OMIB) merupakan sistem satu generator yang menyuplai daya ke suatu jaringan listrik yang sangat besar sehingga diwakilkan oleh *infinite bus* yang dihubungkan oleh saluran transmisi secara paralel.



Gambar 2.1 Diagram *Single line SIMB*

(<https://www.kullabs.com>)

Pada pemodelan SMIB untuk analisis *small signal stability* dilakukan asumsi-asumsi sebagai berikut:

- Daya input mekanik dianggap konstan selama terjadi gangguan.
- Redaman dari stator diabaikan.
- Tahanan *stator* dianggap nol.

- d. Generator dianggap sebagai sumber tegangan konstan.
- e. Sudut rotor sama dengan sudut fasa tegangan *output* generator.

2.5 Persamaan Ayunan

Persamaan ayunan merupakan persamaan yang mengatur pergerakan atau putaran rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika (Rifai, 2008). Pada mesin sinkron, rotor memberikan torsi mekanik pada poros mesin dan poros mesin menghasilkan torsi elektrik. Saat terjadi suatu gangguan, torsi elektrik lebih kecil dari torsi mekanik sehingga menghasilkan torsi percepatan seperti pada persamaan berikut:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.4)$$

Dengan:

J = Momen kelembaman total dari massa rotor (kg.m^2)

θ_m = Sudut pergeseran rotor (rad)

T = Waktu (detik)

T_a = Torsi percepatan (Nm)

T_m = Torsi mekanik (Nm)

T_e = Torsi elektrik (Nm)

Untuk mengukur perubahan sudut θ_m terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron adalah sebagai berikut:

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \quad (2.5)$$

Dimana δ_m merupakan pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron.

Penurunan persamaan tersebut terhadap waktu memberikan kecepatan putaran motor dalam persamaan:

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.6)$$

dan percepatan rotornya adalah

$$\frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} \quad (2.7)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan maka diperoleh

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

Kemudian mengalikan persamaan tersebut dengan ω_m dan diperoleh persamaan:

$$J \omega_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.9)$$

Apabila kecepatan putar dikalikan dengan torsi sama dengan daya, maka dapat ditulis sebagai persamaan daya berikut:

$$J \omega_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.10)$$

$J \omega_m$ merupakan momen sudut rotor yang dinyatakan dengan M . Adapun hubungan antara energi kinetik dan massa berputar ditunjukkan dalam persamaan berikut:

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \quad (2.11)$$

Atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad (2.12)$$

Jika ω_m tidak berubah sebelum hilangnya stabilitas sistem, maka M dievaluasi pada kecepatan serempak dalam persamaan:

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \quad (2.13)$$

Hubungan antara persamaan ayunan dengan momen sudut adalah

$$M \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.14)$$

2.6 Reduksi Matriks Admitansi

Untuk menghitung daya dari masing – masing generator, matriks admitansi perlu direduksi terlebih dahulu menjadi matriks $m \times m$ dimana m merupakan jumlah generator pada sistem tenaga. Mereduksi matriks admitansi dapat dilakukan menggunakan penghapusan simpul dengan aljabar matriks.

Untuk menghindari pembalikan suatu matriks, maka dilakukan penghapusan setiap kali satu simpul sehingga menjadikan prosesnya lebih sederhana. Simpul yang dihapus haruslah simpul yang bernomor paling tinggi yang nantinya mungkin memerlukan penomoran kembali. Matriks admitansi asli akan disekat menjadi matriks \mathbf{K} , \mathbf{L} , \mathbf{L}^T dan \mathbf{M} seperti berikut.

$$\mathbf{Y}_{\text{rel}} = \left[\begin{array}{ccc|c}
 \underbrace{Y_{11} \cdots Y_{1j} \cdots}_{\mathbf{K}} & & & Y_{1n} \\
 \vdots & & & \vdots \\
 Y_{k1} & \cdots & Y_{kj} & \cdots & Y_{kn} \\
 \vdots & & \vdots & & \vdots \\
 \hline
 Y_{n1} & \cdots & Y_{nj} & \cdots & Y_{nn} \\
 \underbrace{\hspace{10em}}_{\mathbf{L}^T} & & & & \underbrace{\hspace{2em}}_{\mathbf{M}}
 \end{array} \right] \mathbf{L}$$

(sumber: William D. Stevenson, Jr., 2005)

Setelah langkah tersebut, maka unsur pada baris k dan kolom j dari matriks baru $(n - 1) \times (n - 1)$ menjadi

$$Y_{kj}(\text{baru}) = Y_{kj}(\text{asli}) - \frac{Y_{kn} Y_{nj}}{Y_{nn}} \quad (2.15)$$

Apabila rumus penghapusan simpul matriks ini diterapkan pada program Matlab dapat dilakukan dengan mengurangi matriks \mathbf{K} dengan hasil kali antara matriks \mathbf{L} dan matriks \mathbf{L}^T yang dibagi matriks \mathbf{M} atau dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Y_{\text{rel}}^{\text{reduksi}} = \mathbf{K} - \mathbf{L}\mathbf{L}^T\mathbf{M}^{-1} \quad (2.16)$$

2.7 Perhitungan Daya Mekanik, Elektrik dan Percepatan

Data – data sistem tenaga IEEE 9 *Bus Test System* yang diketahui kemudian dimodelkan dalam *software Power World Simulator*. Untuk mengetahui parameter yang tidak diketahui seperti daya pembangkitan dan tegangan terminal generator, maka dilakukan dengan penyelesaian aliran daya. Selanjutnya melakukan perhitungan nilai daya mekanik, daya elektrik, daya percepatan dan percepatan masing – masing generator dengan langkah perhitungan berikut.

- Persamaan untuk menghitung arus yang mengalir dari generator

$$I_i = \frac{(P_i + jQ_i)^*}{V_i^*}, \text{ dimana } i = 1, 2, \dots, m \quad (2.17)$$

dimana m merupakan jumlah generator, P_i dan Q_i merupakan daya aktif dan daya reaktif generator ke- i , dan V_i adalah tegangan terminal generator ke- i .

- Persamaan untuk menghitung tegangan peralihan generator

$$E_i = V_i + jX_d I_i \quad (2.18)$$

dimana jX_d merupakan reaktansi peralihan generator ke- i .

- Persamaan untuk menghitung daya mekanik generator

$$P_i = P_{mi} - E_i^2 G_{ii} \quad (2.19)$$

dimana G_{ii} merupakan bagian real admitansi Y_{ii} dari matriks admitansi yang telah direduksi.

- Persamaan untuk menghitung daya elektrik generator

$$P_{ei} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (E_i E_j B_{ij} \sin \delta_{ij} + E_i E_j G_{ij} \cos \delta_{ij}) \quad (2.20)$$

dimana B_{ij} merupakan bagian imajiner admitansi Y_{ij} dari matriks admitansi yang telah direduksi dan δ_{ij} merupakan sudut rotor ke- i dikurangi sudut rotor ke- j ($\delta_i - \delta_j$).

- Persamaan untuk menghitung daya percepatan generator

$$P_{ai} = P_i - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} \quad (2.21)$$

dimana M_T merupakan konstanta inersia system dan $PCOA$ merupakan daya center of angle yang dihitung dengan persamaan

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i \quad (2.22)$$

$$P_{COA} = \sum_{j=1}^n P_j - 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n E_i E_j G_{ij} \quad (2.23)$$

- Persamaan untuk menghitung percepatan generator

$$a_i = \frac{P_{ai}}{M_i} \quad (2.24)$$

Untuk nilai percepatan generator dapat diketahui dengan membagi nilai daya percepatan generator dengan konstanta inersia generator.

2.8 Reduksi Sistem Multi-mesin Menjadi *One Machine Infinite Bus*

Dalam menyelesaikan waktu pemutus kritis dengan konsep penyelesaian *one machine infinite bus*, sistem tenaga listrik multimesin di reduksi terlebih dahulu menjadi *one machine infinite bus*. Mesin – mesin akan dikelompokkan ke dalam dua grup, yaitu grup mesin kritis dan grup mesin tidak kritis. Kemudian kedua grup mesin akan dikombinasikan menjadi sistem *one machine infinite bus*.

Dalam pengelompokan grup mesin kritis dan tidak kritis, sebelumnya menentukan terlebih dahulu mesin yang tergolong sebagai *severely disturbed machines* (SDM) yaitu mesin – mesin yang sangat terganggu atau terpengaruh oleh

gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik. Suatu generator tergolong dalam mesin SDM apabila memenuhi persamaan berikut.

$$\frac{|a_i^f|}{a_{max}^f} > \alpha \quad (2.25)$$

Dimana a_i^f merupakan percepatan dari mesin atau generator ke- i pada saat gangguan dan a_{max}^f merupakan nilai absolut maksimum percepatan mesin. Serta α merupakan batas toleransi yang diperbolehkan yaitu 0,7 (Irrine, 2012). Penentuan mesin kritis dilakukan dengan menghitung daya percepatan setelah gangguan mesin - mesin SDM melalui persamaan 2.21. Apabila nilai daya percepatan setelah gangguan dari mesin SDM melewati garis nol maka mesin tersebut merupakan mesin kritis.

Setelah mengelompokkan mesin - mesin ke dalam kelompok mesin kritis dan mesin tidak kritis, selanjutnya mereduksi kedua kelompok mesin tersebut menjadi *One Machine Infinite Bus* (OMIB) dengan persamaan berikut.

Momen inersia untuk mesin kritis dan mesin tidak kritis

$$M_C = \sum_{k \in C} M_k \quad (2.26)$$

$$M_N = \sum_{j \in N} M_j \quad (2.27)$$

Momen inersia untuk sistem tenaga OMIB

$$M_{OMIB} = \frac{M_C M_N}{M_C + M_N} \quad (2.28)$$

Persamaan untuk menentukan sudut rotor mesin kritis

$$\delta_C = \frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} M_k \delta_k \quad (2.29)$$

Persamaan untuk menentukan sudut rotor mesin tidak kritis

$$\delta_N = \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} M_j \delta_j \quad (2.30)$$

Persamaan untuk menentukan sudut rotor OMIB

$$\delta_{OMIB} = \delta_C - \delta_N \quad (2.31)$$

Persamaan daya output elektrik dan mekanik sistem OMIB

$$P_e = M \left(\frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} P_{ek} - \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} P_{ej} \right) \quad (2.32)$$

$$P_m = M \left(\frac{1}{M_C} \sum_{k \in C} P_{mk} - \frac{1}{M_N} \sum_{j \in N} P_{mj} \right) \quad (2.33)$$

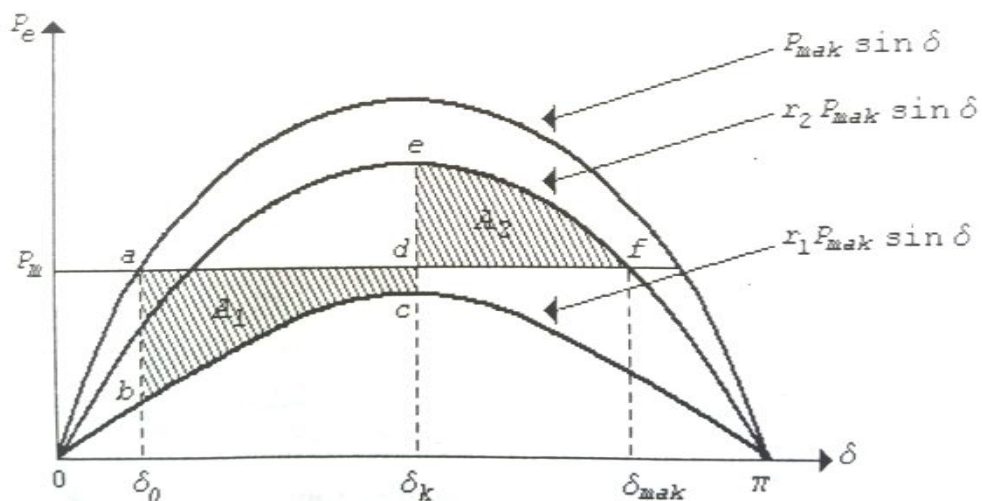
Percepatan daya pada sistem OMIB

$$P_a = P_m - P_e \quad (2.34)$$

2.9 Metode Kriteria Sama Luas

Waktu pemutus kritis merupakan waktu yang diizinkan untuk memutuskan gangguan agar generator tidak mengalami lepas sinkron (M. Maulana, 2016). Apabila gangguan diputus kurang dari waktu kritis yang telah ditentukan maka generator akan kembali stabil, namun apabila gangguan diputus melebihi waktu kritis yang telah ditentukan maka generator akan berada pada kondisi tidak stabil dan dapat lepas sinkron. Estimasi *critical clearing time* berguna dalam pengaturan waktu *relay* proteksi.

Untuk menentukan *Critical Clearing Time* (CCT), perlu terlebih dahulu menghitung sudut pemutus kritis atau *Critical Clearing Angle* (CCA). Estimasi *critical clearing angle* dilakukan menggunakan metode Kriteria Luas Sama. Gambar 2.2 menunjukkan diagram sudut daya dimana *critical clearing angle* dan *critical clearing time* akan dihitung. Luasan yang dibatasi δ_0 sampai δ_{er} menunjukkan daya yang terserap. Rotor berayun sampai δ_2 , yaitu saat luas A_1 dan A_2 sama. Pada keadaan ini P_m adalah daya maksimum saat peniadaan gangguan dan δ_{er} disebut sebagai sudut peniadaan kritis (Sulasno, 1993).



Gambar 2.2 Grafik Sudut Daya yang Menunjukkan *Critical Clearing Angle*

(Cekmas Cekdin, 2007)

Luas segi-empat A_1 dan A_2 adalah:

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_0 d\delta = P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_2} (P_{mak} \sin \delta - P_0) d\delta \\ &= P_{mak} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_2) - P_0 (\delta_2 - \delta_{cr}) \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) = P_{mak} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_2) - P_0 (\delta_2 - \delta_{cr}) \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} P_0 (\delta_{cr} - \delta_0 + \delta_2 - \delta_{cr}) &= P_{mak} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_2) \\ \cos \delta_{cr} &= \frac{P_0}{P_{mak}} (\delta_2 - \delta_0) + \cos \delta_2 \end{aligned} \quad (2.38)$$

$$\text{Dari } \delta_2 = \pi - \delta_0 \text{ dan } P_0 = P_{mak} \sin \delta_0$$

Dengan mensubstitusikan δ_2 dan P_0 ke dalam persamaan, maka diperoleh:

$$\cos \delta_{cr} = \sin \delta_0 (\pi - \delta_0 - \delta_0) + \cos (\pi - \delta_0) \quad (2.39)$$

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} \{ (\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0 \} \quad (2.40)$$

Untuk gangguan yang letaknya bukan pada ujung kirim dan mempertimbangkan kondisi selama dan sesudah gangguan, maka persamaan untuk *critical clearing angle* menjadi:

$$\delta_{cr} = \frac{(P_m/P_{maks})(\delta_{maks} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{maks} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \quad (2.41)$$

$$r_1 = P_e^f / P_e \quad (2.42)$$

$$r_2 = P_e^p / P_e \quad (2.43)$$

Dengan :

δ_{cr} = *critical clearing angle* atau sudut pemutus kritis

δ_0 = sudut rotor awal

δ_{maks} = sudut rotor maksimum

r_1 = hasil bagi daya elektrik selama gangguan oleh daya elektrik sebelum gangguan

r_2 = hasil bagi daya elektrik setelah gangguan oleh daya elektrik sebelum gangguan

2.10 Metode Runge-Kutta Orde 4

Metode Runge-Kutta Orde 4 digunakan untuk melakukan estimasi *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem tenaga yang telah di reduksi menjadi OMIB.

Estimasi CCT dengan metode Runge-Kutta orde 4 ini mengacu pada sudut pemutus kritis yang diperoleh dari perhitungan *critical clearing angle* metode Kriteria Sama Luas. Berikut empat fungsi konstan persamaan Runge-Kutta orde 4 (Irrine, 2012).

$$k_1 = f(t_i, x_i)\Delta t \quad (2.44)$$

$$k_2 = f(t_i + (0,5)\Delta t, x_i + (0,5)k_1)\Delta t \quad (2.45)$$

$$k_3 = f(t_i + (0,5)\Delta t, x_i + (0,5)k_2)\Delta t \quad (2.46)$$

$$k_4 = f(t_i + \Delta t, x_i + k_3)\Delta t \quad (2.47)$$

Dengan x ditentukan dengan persamaan

$$x_{i+1} = x_i + \left(\frac{1}{6}\right)(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.48)$$

Apabila persamaan Runge-Kutta orde 4 tersebut diterapkan pada persamaan Kriteria Luas Sama untuk menentukan CCT, maka persamaan tersebut menjadi (Irrine, 2012):

$$k_1 = f(\delta_i, \omega_i)\Delta t = \omega_i\Delta t \quad (2.49)$$

$$l_1 = g(\delta_i, \omega_i)\Delta t = \left(\frac{\pi f}{H_i}\right)P_a^f \sin(\delta_i)\Delta t \quad (2.50)$$

$$k_2 = f(\delta_i + 0,5k_1, \omega_i + 0,5l_1)\Delta t = (\omega_i + 0,5l_1)\Delta t \quad (2.51)$$

$$l_2 = g(\delta_i + 0,5k_1, \omega_i + 0,5l_1)\Delta t = (\pi f/H_i)P_a^f \sin(\delta_i + 0,5k_1)\Delta t \quad (2.52)$$

$$k_3 = f(\delta_i + 0,5k_2, \omega_i + 0,5l_2)\Delta t = (\omega_i + 0,5l_2)\Delta t \quad (2.53)$$

$$l_3 = g(\delta_i + 0,5k_2, \omega_i + 0,5l_2)\Delta t = (\pi f/H_i)P_a^f \sin(\delta_i + 0,5k_2)\Delta t \quad (2.54)$$

$$k_4 = f(\delta_i + k_3, \omega_i + l_3)\Delta t = (\omega_i + l_3)\Delta t \quad (2.55)$$

$$l_4 = g(\delta_i + k_3, \omega_i + l_3)\Delta t = \left(\frac{\pi f}{H_i}\right)P_a^f \sin(\delta_i + k_3)\Delta t \quad (2.56)$$

Maka akan diperoleh nilai δ dan ω dengan persamaan:

$$\delta_{i+1} = \delta_i + \left(\frac{1}{6}\right)(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (2.57)$$

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \left(\frac{1}{6}\right)(l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \quad (2.58)$$

Dengan, $\delta_1 = \delta_0$ dan $\omega_i = 0$

Iterasi akan berhenti apabila $\delta_n = \delta_{cr}$

Dengan diperolehnya *critical clearing time*, dapat ditentukan penyetelan atau *setting* waktu dari sistem proteksi. Keadaan yang stabil diperoleh jika *setting* waktu *relay* pengaman lebih kecil atau sama dengan *critical clearing time*.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan tentang tempat dan waktu pelaksanaan penelitian, jenis dan sumber data, metode pengumpulan data, langkah – langkah simulasi dan diagram alir penelitian.

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Fakultas Teknik Universitas Jember yang mulai dikerjakan mulai Desember 2017 dan diselesaikan pada Juni 2018.

3.2 Alat dan Bahan

Jenis dan sumber data menjelaskan tentang keseluruhan alat dan bahan yang digunakan dalam melaksanakan penelitian, sebagai berikut:

- a. Laptop
- b. *Software* aplikasi *Power World Simulator*
- c. *Software* aplikasi MATLAB
- d. Data sistem tenaga listrik IEEE 9 Bus Test System

Data sistem tenaga IEEE 9 Bus Test System merupakan data pengujian sistem tenaga yang terdiri dari 3 generator sinkron, 9 bus, 3 transformator dan 3 beban.

3.3 Data Sistem Tenaga IEEE 9 Bus Test System

Berikut data sistem tenaga IEEE 9 Bus Test System yang meliputi tabel data pembangkit, saluran dan beban serta *single line* dalam *Power World Simulator*.

Tabel 3.1 Data Pembangkit IEEE 9 Bus Test System

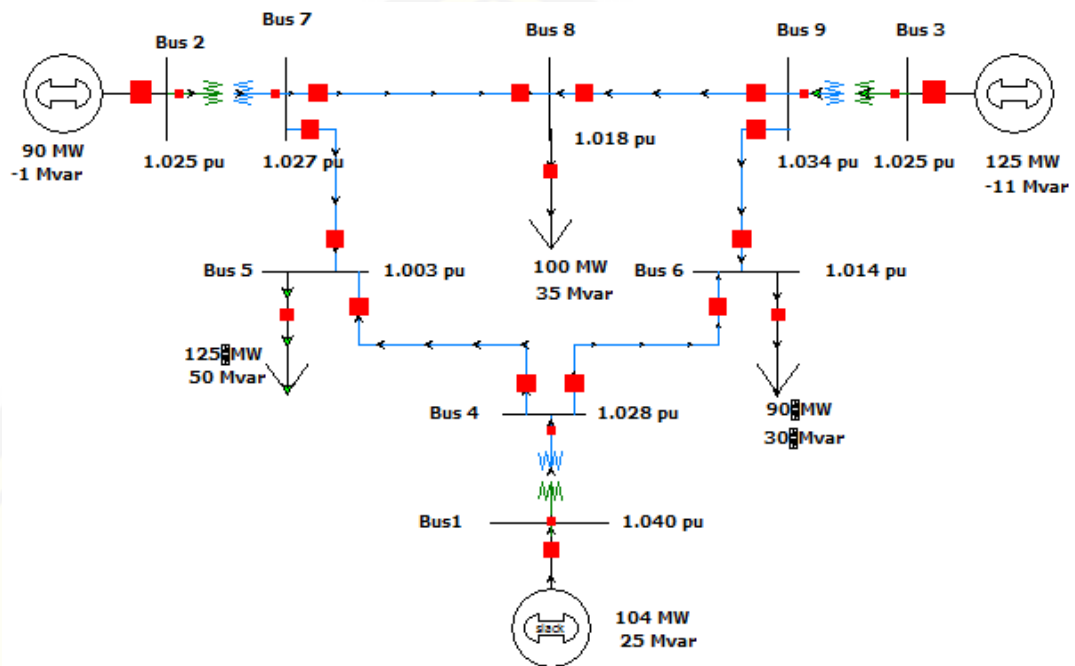
Parameter	Generator		
	Bus 1	Bus 2	Bus 3
Rated power (MVA)	512	270	125
Rated voltage (kV)	24	18	15,5
X'd (pu)	0,2700	0,2560	0,1740
M	2,6312	4,1296	4,7680

Tabel 3.2 Data Saluran IEEE 9 Bus Test System

Saluran		Z seri (pu)		Y shunt B/2 (pu)
Dari bus	Ke bus	Resistansi (pu)	Reaktansi (pu)	
1	4	0,0000	0,0576	0,0000
2	7	0,0000	0,0625	0,0000
3	9	0,0000	0,0586	0,0000
4	5	0,0100	0,0680	0,0880
4	6	0,0170	0,0920	0,0790
5	7	0,0320	0,1610	0,1530
6	9	0,0390	0,1738	0,1790
7	8	0,0085	0,0576	0,0745
8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 3.3 Data Beban IEEE 9 Bus Test System

Bus	Beban	
	Daya aktif, P (pu)	Daya reaktif, Q (pu)
1	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000
4	0,0000	0,0000
5	1,2500	1,2500
6	0,9000	0,9000
7	0,0000	0,0000
8	1,0000	1,0000
9	0,0000	0,0000



Gambar 3.1 Single Line Sistem Tenaga IEEE 9 Bus Test System

3.4 Tahapan Penelitian

Dalam pelaksanaan tugas akhir ini terdapat beberapa tahapan penelitian yang akan dilakukan. Secara garis besar tahapan penelitian terbagi dalam 5 bagian utama yakni sebagai berikut:

a. Tahapan Studi Pustaka

Pada tahapan ini merupakan tahapan yang membantu dalam menemukan referensi atau rujukan terkait dengan penelitian yang serupa, dimana referensi atau rujukan tersebut nantinya akan dijadikan sebagai acuan dalam melaksanakan penelitian.

b. Tahapan Pengambilan Data

Pada penelitian ini data yang digunakan merupakan data IEEE 9 Bus Modified Test System yang diperlukan untuk melakukan simulasi, terdiri dari data pembangkitan generator, reaktansi saluran, pembebanan dan data lainnya.

c. Tahapan Simulasi

Pada tahap ini dilakukan simulasi stabilitas transien berdasarkan data yang telah diperoleh. Pemodelan sistem tenaga dilakukan menggunakan *software Power*

World Simulator. Untuk menyelesaikan masalah stabilitas transien menggunakan *software* MATLAB yaitu menentukan *critical clearing time*.

d. Tahapan Analisis Data

Pada tahap ini analisa data dilakukan setelah mendapatkan data dari tahapan simulasi. Analisis data dilakukan untuk mengetahui bagaimana pengaruh waktu pemutus apabila kurang dari, sama dengan dan lebih dari CCT terhadap kurva ayunan generator pada kestabilan sistem tenaga.

e. Tahapan Penulisan Laporan dan Kesimpulan

Pada tahap ini merupakan tahapan akhir dari penelitian yang telah dilaksanakan. Data yang telah diperoleh dari simulasi dianalisis dan ditulis dalam sebuah laporan. Analisis dilakukan untuk membuktikan kesesuaian antara penelitian yang telah dilakukan dengan sumber rujukan atau referensi yang telah diperoleh.

3.5 Metode Simulasi

Pelaksanaan simulasi dan pemodelan sistem tenaga listrik dilakukan dengan menggunakan *software Power World Simulator*. *Software Power World Simulator* berfungsi untuk memodelkan sistem tenaga mengetahui kondisi dan parameter awal sistem tenaga. Dalam simulasi stabilitas transien ini, diberikan gangguan pada sistem tenaga berupa gangguan tiga fasa seimbang ke tanah. Untuk menentukan *critical clearing angle* dan *critical clearing time*, dilakukan dengan penyelesaian secara numerik menggunakan *software* MATLAB R2009a.

Setelah memperoleh data – data yang dibutuhkan, selanjutnya melakukan simulasi dan analisis dengan langkah – langkah sebagai berikut:

- a. Membuat pemodelan *single line* diagram sistem tenaga pada *software Power World Simulator* berdasarkan data IEEE 9 Bus Test System.
- b. Menjalankan program aliran daya pada *Power World Simulator* untuk memperoleh nilai parameter awal.
- c. Menghitung matriks admitansi sebelum terjadi gangguan dan mereduksinya menjadi matriks *mxm* sesuai jumlah generator.

- d. Menguji sistem menggunakan gangguan tiga fasa seimbang ke tanah dan kemudian menghitung matriks admitansi saat terjadinya gangguan serta reduksi matriks admitansinya.
- e. Memutus saluran letak gangguan dan menghitung matriks admitansi setelah terjadinya gangguan serta reduksi matriks admitansinya.
- f. Menghitung arus yang mengalir dari generator, tegangan peralihan generator dan sudut kerja awal rotor dengan persamaan 2.17 dan 2.18.
- g. Menghitung daya mekanik, daya elektrik dan daya percepatan masing – masing generator sebelum gangguan, selama gangguan dan setelah gangguan diputuskan dengan persamaan 2.19, 2.20 dan 2.21.
- h. Menentukan generator yang tergolong mesin kritis dan mesin tidak kritis dengan persamaan 2.24.
- i. Kemudian grup mesin kritis dan grup mesin tidak kritis direduksi menjadi OMIB dengan persamaan 2.26 hingga 2.34.
- j. Menghitung *critical clearing angle* sistem yang telah direduksi menjadi OMIB menggunakan Metode Kriteria Sama Luas persamaan 2.41.
- k. Menghitung *critical clearing time* sistem tenaga yang telah direduksi menjadi OMIB menggunakan Metode Runge-Kutta Orde 4 dengan *software* MATLAB.
- l. Plot kurva ayunan sudut rotor dengan memasukkan waktu pemutus kurang dari, lebih dari dan sama dengan *critical clearing time* (CCT).
- m. Mengulangi langkah e hingga l dengan kondisi simulasi yang berbeda sesuai yang telah ditentukan.
- n. Melakukan analisis terhadap data hasil penelitian.
- o. Pengambilan kesimpulan.

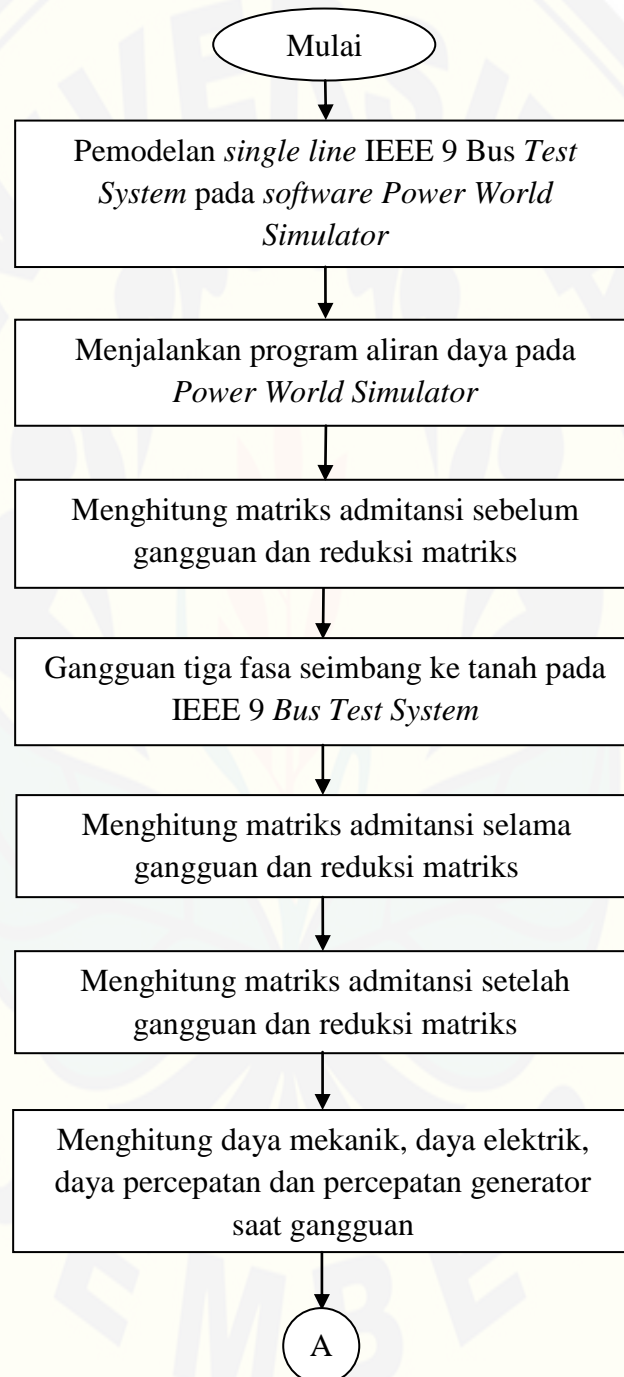
Langkah – langkah reduksi sistem multi-mesin menjadi sistem *one machine infinite bus* adalah sebagai berikut:

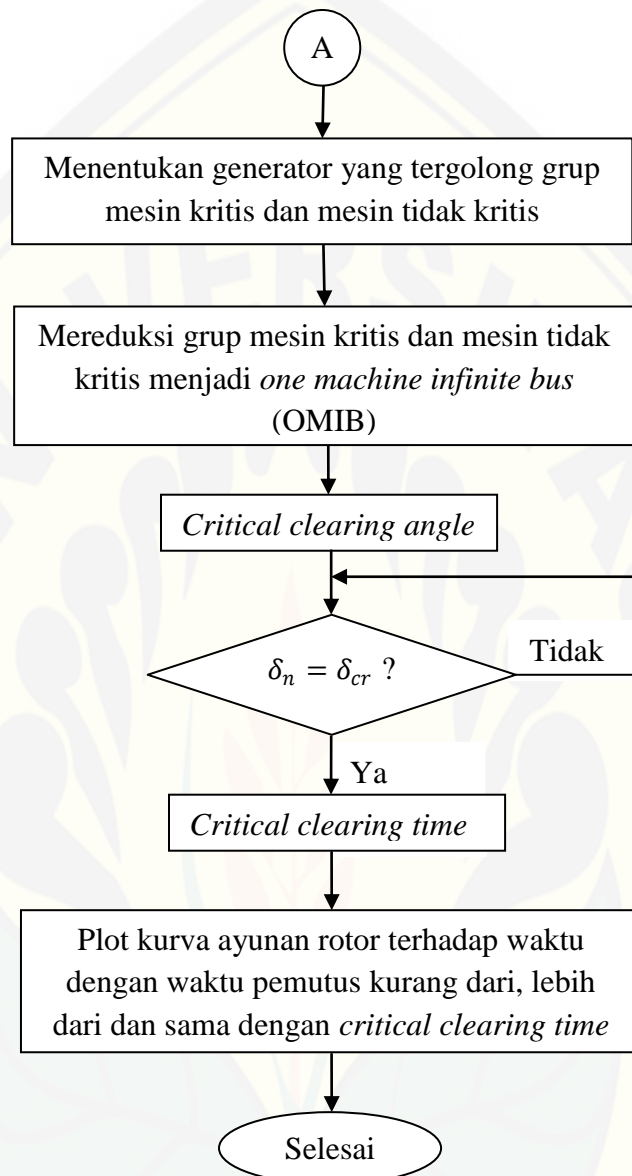
- a. Menghitung nilai percepatan masing – masing generator selama gangguan melalui persamaan 2.21 menggunakan data selama gangguan hubung singkat terjadi.

- b. Setelah mengetahui nilai percepatan masing – masing generator selama gangguan, kemudian menentukan nilai percepatan tertinggi dari semua generator untuk ditetapkan sebagai nilai percepatan maksimal.
- c. Menghitung hasil bagi percepatan selama gangguan oleh percepatan maksimal pada masing – masing generator melalui persamaan 2.25.
- d. Setelah itu menentukan generator yang tergolong dalam mesin kritis dan mesin tidak kritis. Berdasarkan persamaan 2.25, apabila hasil bagi percepatan selama gangguan oleh percepatan maksimal lebih dari 0,7 maka generator tergolong mesin kritis. Sebaliknya apabila kurang dari 0,7 maka generator tergolong mesin tidak kritis.
- e. Setelah mengetahui generator yang tergolong mesin kritis dan mesin tidak kritis, lalu menghitung parameter mesin kritis dan mesin tidak kritis melalui persamaan 2.36 hingga 2.30.
- f. Selanjutnya mengkombinasi grup mesin kritis dan mesin tidak kritis menjadi sistem *one machine infinite bus* dengan menghitung parameter sistem *one machine infinite bus* melalui persamaan 2.28 hingga 2.34.

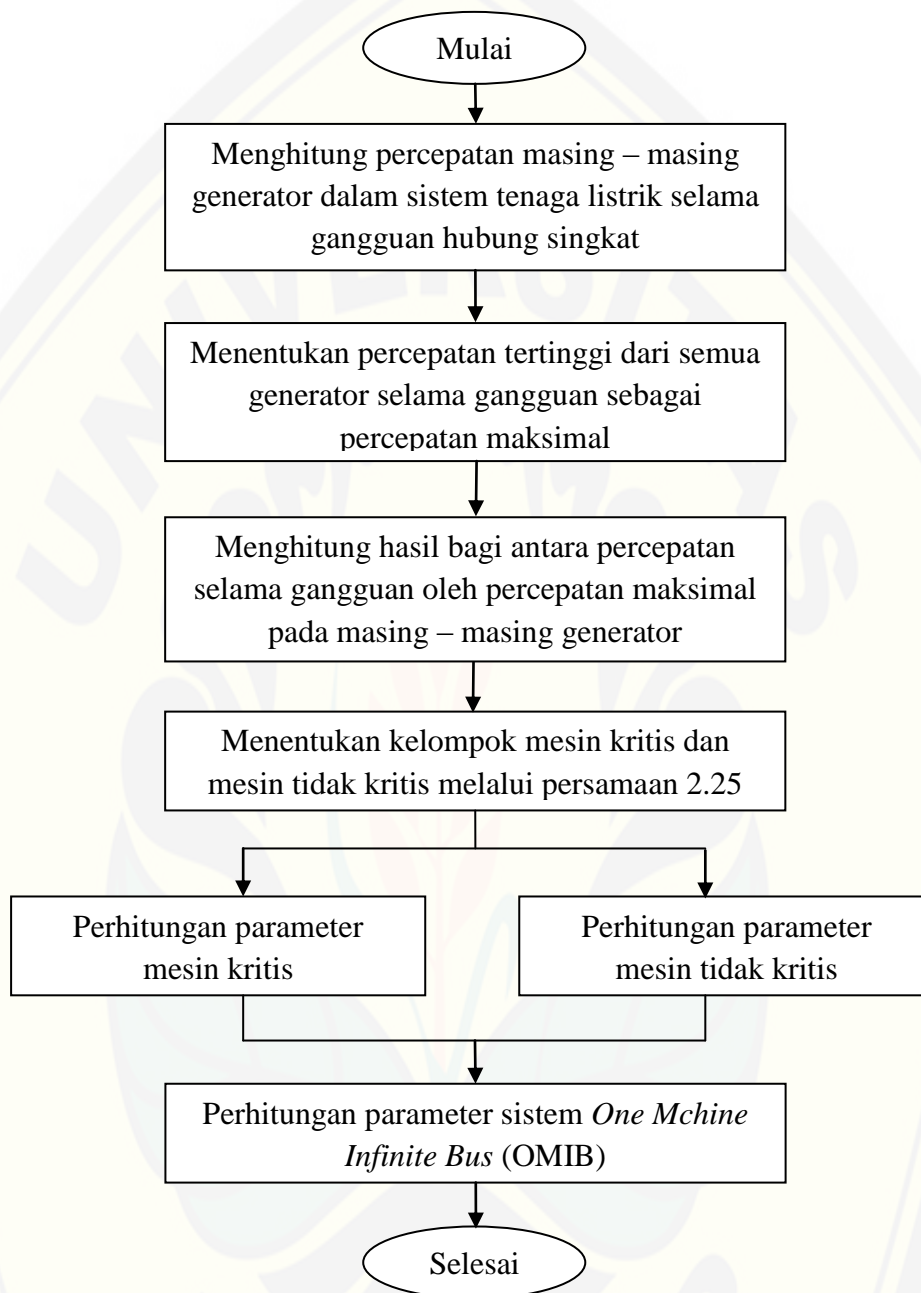
3.6 Diagram Alir (*Flowchart*)

Berikut adalah diagram alir atau flowchart penelitian yang ditunjukkan dalam gambar 3.2.



Gambar 3.2 *Flowchart* Penelitian

Berikut merupakan *flowchart* proses reduksi sistem multi-mesin menjadi *one machine infinite bus*.



Gambar 3.3 *Flowchart* Reduksi Sistem Multi-mesin Menjadi OMIB

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian nilai *critical clearing angle* dan *critical clearing time* sistem multi-mesin dengan konsep OMIB yang telah dilaksanakan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut.

1. Semakin kecil konstanta inersia dan semakin besar reaktansi peralihan akan memungkinkan suatu generator menjadi tidak stabil saat keadaan gangguan. Dalam penelitian ini diperoleh hasil Generator 3 merupakan mesin kritis karena memenuhi nilai alfa yaitu lebih dari 0,7. Generator 3 merupakan generator dengan nilai konstanta inersia dan reaktansi peralihan terkecil dibandingkan dengan dua generator lainnya.
2. Kondisi gangguan penelitian ini terletak pada bus yang sama yaitu Gangguan A pada saluran 6-9 dekat bus 9 dan Gangguan B pada saluran 8-9 dekat bus 9. Kedua kondisi memiliki parameter yang sama dalam menghitung *critical clearing angle* kecuali parameter r_2 . Hal tersebut dikarenakan daya elektrik kedua kondisi setelah gangguan diputus adalah berbeda akibat perbedaan matriks admitansi setelah gangguan. Perbedaan nilai r_2 menyebabkan *critical clearing angle* kedua kondisi berbeda walaupun nilai sudut rotor awal dan sudut rotor maksimalnya sama. Pada Gangguan A nilai *critical clearing angle* adalah 96,18 derajat sedangkan pada Gangguan B adalah 86,5217 derajat.
3. Dalam stabilitas transien, apabila waktu pemutusan kurang dari atau sama dengan *critical clearing time* maka sistem tenaga masih dapat mempertahankan kestabilannya. Sedangkan ketika waktu pemutusan lebih dari *critical clearing time*, maka sistem akan kehilangan kestabilannya. Hal ini menyebabkan rotor lepas sinkron dan tidak terjadi ayunan karena sudut rotor terus meningkat terhadap waktu. Pada kondisi Gangguan A nilai *critical clearing time* adalah 0,346 detik sedangkan pada kondisi Gangguan B adalah 0,328 detik.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian nilai *critical clearing angle* dan *critical clearing time* sistem multi-mesin dengan konsep OMIB yang telah dilaksanakan, berikut saran penulis untuk pengembangan di masa yang akan datang:

1. Sistem tenaga yang digunakan dalam menguji stabilitas transien menggunakan sistem yang lebih besar.
2. Melakukan estimasi nilai CCT secara *online*.

DAFTAR PUSTAKA

- Allan L. While. 2004. *Transient Fault and Network Reability. IEE Aeospace Conference Proceedings*, Hampton.
- Bijang, Nathaniel L. 2012. Analisa Waktu Pemutusan Kritis Suatu Sistem Kelistrikan. *Jurnal Ilmiah Sains* Vol. 12 No. 2 Oktober 2012.
- Cekdin, Cekmas. 2007. *Sistem Tenaga Listrik, Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan MATLAB*. Yogyakarta: ANDI.
- Fathoni, M. Maulana Irfan. 2016. Analisis *Setting* Waktu Rele Pengaman di PT. Pupuk Sriwidjaja dengan Mempertimbangkan *Transient Stability Assessment*. Surabaya: ITS.
- Hadi, Lukman. 2011. Studi Stabilitas Transient Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Kriteria Sama Luas. Jember: Universitas Jember.
- Haque, M. H. 1994. *Equal-Area Criterion: An Extension for Multimachine Power System. Journal of IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution* Volume 141, No. 3, pages 191-197.
- Haque, M. H. 1995. *Further Developments of The Equal-Area Criterion for Multimachine Power System. Journal of Electical Power System Research* 33 page 175-183. *Departement of Electrical and Computer System Engineering, Monash University, Clayton, Vic, 3168, Australia*.
- Kamdar, Renuka, Manoj Kumar dan Ganga Agnihotri. 2014. *Transient Stability Analysis and Enhancement of IEEE-9 Bus System. Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ) Volume 3, Number 2, June 2014*.
- KIOS Research and Innovation Center of Excellent. IEEE 9 Bus Modified Test System. University of Cyprus and Imperial College London*. Diambil dari: <http://www.kios.ucy.ac.cy> (4 Juni 2017)
- Kullabs. *Swing Equation of a Single Machine Infinite Bus Sistem*. Diambil dari: <https://www.kullabs.com/classes/subjects/units/lessons/notes/note-detail/3880> (9 Juni 2017)
- Listrik.org. Maret 2017. Program Pembangkit Listrik 35000 MW. Diambil dari: <http://listrik.org/pln/program-35000-mw/> (2 Juni 2017)

- P. Kundur. 1994. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.
- Robert, H. Milner & James, H. Malinowski. 1994. *Power Sistem Operation*. New York: McGraw-Hill.
- Saputra, Luthfan Bagus. 2014. Studi Evaluasi Seting Rele Proteksi Hubung Singkat Transformator 21 KV/ 512,5 KV Terhadap Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Di PT. YTL. Malang: Universitas Brawijaya.
- Suharno, Dedi Nono. 1999. *Pemodelan Sistem Tenaga Listrik Multimesin, Studi Kasus: Sistem 500KV interkoneksi Jawa-Bali*. Bandung: ITB.
- Sulasno. 1993. *Analisa Sistem Tenaga Listrik*. Semarang: Satya Wacana.
- Sulistiawati, Irrine Budi, Muhammad Abdillah dan Adi Soeprijanto. 2012. *Prediction of Critical Clearing Time of Java-Bali 500 kV Power System Under Multiple Bus Load Changes Using Neural Network Based Transient Stability Model. International Journal on Electrical Engineering and Informatics, Volume 4, Number 1*.
- William D Stevenson, Jr., Kamal Idris (Penerjemah). 2005. *Analisis Sistem Tenaga Listrik, Edisi keempat*. Jakarta: Erlangga.
- Y. Xue, Th. Van Cutsem dan M. Ribbens-Pavella. 1988. *A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assessment of Large Power Systems. Journal of IEEE Transactions on Power System, Vol. 3, No. 2*.
- Y. Zhang. L. Wehenkel, P. Rousseaux dan M. Pavella. 1997. *SIME: A Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection. International Journal of Electrical Power and Energy System, Volume 19, No. 3 pages 195-208*.

LAMPIRAN

A. Listing Program Matriks Admitansi

```

=====
%%==          PERHITUNGAN DAN REDUKSI MATRIKS ADMITANSI          ==%
%%==          SEBELUM, SELAMA DAN SETELAH GANGGUAN              ==%
=====
format short
clc
clear all
%Data saluran dan transformator
=====
%          Impedansi (p.u)      |  Y shunt B/2 (p.u      |      Bus ke bus
=====
ZT14 = j*0.0576;                % Trafo 1-4
ZT27 = j*0.0625;                % Trafo 2-7
ZT39 = j*0.0586;                % Trafo 3-9
Z45 = 0.0100 + j*0.0680;        Ysh45 = j*0.0880;    % Saluran 4-5
Z46 = 0.0170 + j*0.0920;        Ysh46 = j*0.0790;    % Saluran 4-6
Z57 = 0.0320 + j*0.1610;        Ysh57 = j*0.1530;    % Saluran 5-7
Z69 = 0.0390 + j*0.1738;        Ysh69 = j*0.1790;    % Saluran 6-9
Z78 = 0.0085 + j*0.0576;        Ysh78 = j*0.0745;    % Saluran 7-8
Z89 = 0.0119 + j*0.1008;        Ysh89 = j*0.1045;    % Saluran 8-9
=====
%Reaktansi peralihan generator
Xd1 = j*0.0527;      Xd2 = j*0.0948;      Xd3 = j*0.1392;
% Beban
PL5 = 1.25;          QL5 = j*0.50;
PL6 = 0.90;          QL6 = j*0.30;
PL8 = 1.00;          QL8 = j*0.35;
%Magnitude tegangan bus beban
V5 = 1.0034;        V6 = 1.0143;        V8 = 1.0182;
%Admitansi saluran dan beban
y14 = 1/(ZT14+Xd1);   y41 = y14;
y27 = 1/(ZT27+Xd2);   y72 = y27;
y39 = 1/(ZT39+Xd3);   y93 = y39;
y45 = 1/Z45;          y54 = y45;
y46 = 1/Z46;          y64 = y46;
y57 = 1/Z57;          y75 = y57;
y69 = 1/Z69;          y96 = y69;
y78 = 1/Z78;          y87 = y78;
y89 = 1/Z89;          y98 = y89;
YL5 = (PL5-QL5)/(V5)^2;
YL6 = (PL6-QL6)/(V6)^2;
YL8 = (PL8-QL8)/(V8)^2;
%Admitansi Ybus
Y14 = -y14;          Y41 = Y14;
Y27 = -y27;          Y72 = Y27;
Y39 = -y39;          Y93 = Y39;
Y45 = -y45;          Y54 = Y45;
Y46 = -y46;          Y64 = Y46;
Y57 = -y57;          Y75 = Y57;
Y69 = -y69;          Y96 = Y69;
Y78 = -y78;          Y87 = Y78;

```

```

Y89 = -y89;      Y98 = Y89;
Y11 = y14;
Y22 = y27;
Y33 = y39;
Y44 = y14 + y45 + y46 + Ysh45 + Ysh46;
Y55 = y54 + y57 + Ysh45 + Ysh57 + YL5;
Y66 = y46 + y69 + Ysh46 + Ysh69 + YL6;
Y77 = y72 + y75 + y78 + Ysh57 + Ysh78;
Y88 = y87 + y89 + Ysh78 + Ysh89 + YL8;
Y99 = y93 + y96+ y98 + Ysh69 + Ysh89;
Y12 = 0;      Y13 = 0;      Y15 = 0;      Y16 = 0;      Y17 = 0;      Y18 = 0;
Y19=0;
Y21 = 0;      Y23 = 0;      Y24 = 0;      Y25 = 0;      Y26 = 0;      Y28 = 0;
Y29=0;
Y31 = 0;      Y32 = 0;      Y34 = 0;      Y35 = 0;      Y36 = 0;      Y37 = 0;
Y38=0;
Y42 = 0;      Y43 = 0;      Y47 = 0;      Y48 = 0;      Y49 = 0;
Y51 = 0;      Y52 = 0;      Y53 = 0;      Y56 = 0;      Y58 = 0;      Y59 =0;
Y61 = 0;      Y62 = 0;      Y63 = 0;      Y65 = 0;      Y67 = 0;      Y68 =0;
Y71 = 0;      Y73 = 0;      Y74 = 0;      Y76 = 0;      Y79 = 0;
Y81 = 0;      Y82 = 0;      Y83 = 0;      Y84 = 0;      Y85 = 0;      Y86 =0;
Y91 = 0;      Y92 = 0;      Y94 = 0;      Y95 = 0;      Y97 = 0;

```

```

%=====
%                               MATRIKS ADMITANSI SEBELUM GANGGUAN
%=====
%Matriks admitansi sebelum gangguan (keadaan awal)
Ybus9 =[Y11 Y12 Y13 Y14 Y15 Y16 Y17 Y18 Y19
        Y21 Y22 Y23 Y24 Y25 Y26 Y27 Y28 Y29
        Y31 Y32 Y33 Y34 Y35 Y36 Y37 Y38 Y39
        Y41 Y42 Y43 Y44 Y45 Y46 Y47 Y48 Y49
        Y51 Y52 Y53 Y54 Y55 Y56 Y57 Y58 Y59
        Y61 Y62 Y63 Y64 Y65 Y66 Y67 Y68 Y69
        Y71 Y72 Y73 Y74 Y75 Y76 Y77 Y78 Y79
        Y81 Y82 Y83 Y84 Y85 Y86 Y87 Y88 Y89
        Y91 Y92 Y93 Y94 Y95 Y96 Y97 Y98 Y99];
%Reduksi menjadi matriks 8x8
K8 = Ybus9(1:8,1:8);
L8 = Ybus9(1:8,9);
M8 = Ybus9(9,1:8);
Ybus8 = K8 - L8*(1/Ybus9(9,9))*M8;
%Reduksi menjadi matriks 7x7
K7 = Ybus8(1:7,1:7);
L7 = Ybus8(1:7,8);
M7 = Ybus8(8,1:7);
Ybus7 = K7 - L7*(1/Ybus8(8,8))*M7;
%Reduksi menjadi matriks 6x6
K6 = Ybus7(1:6,1:6);
L6 = Ybus7(1:6,7);
M6 = Ybus7(7,1:6);
Ybus6 = K6 - L6*(1/Ybus7(7,7))*M6;
%Reduksi menjadi matriks 5x5
K5 = Ybus6(1:5,1:5);
L5 = Ybus6(1:5,6);
M5 = Ybus6(6,1:5);
Ybus5 = K5 - L5*(1/Ybus6(6,6))*M5;

```

```

%Reduksi menjadi matriks 4x4
K4 = Ybus5(1:4,1:4);
L4 = Ybus5(1:4,5);
M4 = Ybus5(5,1:4);
Ybus4 = K4 - L4*(1/Ybus5(5,5))*M4;
%Reduksi menjadi matriks 3x3
K3 = Ybus4(1:3,1:3);
L3 = Ybus4(1:3,4);
M3 = Ybus4(4,1:3);
Ybus3 = K3 - L3*(1/Ybus4(4,4))*M3;
Ybus_sebelum = Ybus3;

%=====
%
%          MATRIKS ADMITANSI SELAMA GANGGUAN
%=====
%Gangguan 3 fasa ke tanah pada saluran 8-9 dekat bus 9
%Bus 9 dihapus dari matriks admitansi awal
Yfbus8=[Y11 Y12 Y13 Y14 Y15 Y16 Y17 Y18
        Y21 Y22 Y23 Y24 Y25 Y26 Y27 Y28
        Y31 Y32 Y33 Y34 Y35 Y36 Y37 Y38
        Y41 Y42 Y43 Y44 Y45 Y46 Y47 Y48
        Y51 Y52 Y53 Y54 Y55 Y56 Y57 Y58
        Y61 Y62 Y63 Y64 Y65 Y66 Y67 Y68
        Y71 Y72 Y73 Y74 Y75 Y76 Y77 Y78
        Y81 Y82 Y83 Y84 Y85 Y86 Y87 Y88];
Kf7 = Yfbus8(1:7,1:7);
Lf7 = Yfbus8(1:7,8);
Mf7 = Yfbus8(8,1:7);
Yfbus7 = Kf7 - Lf7*(1/Yfbus8(8,8))*Mf7;
%Reduksi menjadi matriks 6x6
Kf6 = Yfbus7(1:6,1:6);
Lf6 = Yfbus7(1:6,7);
Mf6 = Yfbus7(7,1:6);
Yfbus6 = Kf6 - Lf6*(1/Yfbus7(7,7))*Mf6;
%Reduksi menjadi matriks 5x5
Kf5 = Yfbus6(1:5,1:5);
Lf5 = Yfbus6(1:5,6);
Mf5 = Yfbus6(6,1:5);
Yfbus5 = Kf5 - Lf5*(1/Yfbus6(6,6))*Mf5;
%Reduksi menjadi matriks 4x4
Kf4 = Yfbus5(1:4,1:4);
Lf4 = Yfbus5(1:4,5);
Mf4 = Yfbus5(5,1:4);
Yfbus4 = Kf4 - Lf4*(1/Yfbus5(5,5))*Mf4;
%Reduksi menjadi matriks 3x3
Kf3 = Yfbus4(1:3,1:3);
Lf3 = Yfbus4(1:3,4);
Mf3 = Yfbus4(4,1:3);
Yfbus3 = Kf3 - Lf3*(1/Yfbus4(4,4))*Mf3;
Ybus_gangguan = Yfbus3;

%=====
%
%          MATRIKS ADMITANSI SETELAH GANGGUAN
%=====
%Melepas saluran yang mengalami gangguan yaitu saluran 8-9
%Mengurangi masing - masing Y88 dan Y99 dengan Y89 dan Ysh89

```

```

Ypbus9=[Y11 Y12 Y13 Y14 Y15 Y16 Y17 Y18           Y19
        Y21 Y22 Y23 Y24 Y25 Y26 Y27 Y28           Y29
        Y31 Y32 Y33 Y34 Y35 Y36 Y37 Y38           Y39
        Y41 Y42 Y43 Y44 Y45 Y46 Y47 Y48           Y49
        Y51 Y52 Y53 Y54 Y55 Y56 Y57 Y58           Y59
        Y61 Y62 Y63 Y64 Y65 Y66 Y67 Y68           Y69
        Y71 Y72 Y73 Y74 Y75 Y76 Y77 Y78           Y79
        Y81 Y82 Y83 Y84 Y85 Y86 Y87 Y88-y89-Ysh89 Y89-Y89
        Y91 Y92 Y93 Y94 Y95 Y96 Y97 Y98-Y89       Y99-y89-Ysh89];

%Reduksi menjadi matriks 8x8
Kp8 = Ypbus9(1:8,1:8);
Lp8 = Ypbus9(1:8,9);
Mp8 = Ypbus9(9,1:8);
Ypbus8 = Kp8 - Lp8*(1/Ypbus9(9,9))*Mp8;
%Reduksi menjadi matriks 7x7
Kp7 = Ypbus8(1:7,1:7);
Lp7 = Ypbus8(1:7,8);
Mp7 = Ypbus8(8,1:7);
Ypbus7 = Kp7 - Lp7*(1/Ypbus8(8,8))*Mp7;
%Reduksi menjadi matriks 6x6
Kp6 = Ypbus7(1:6,1:6);
Lp6 = Ypbus7(1:6,7);
Mp6 = Ypbus7(7,1:6);
Ypbus6 = Kp6 - Lp6*(1/Ypbus7(7,7))*Mp6;
%Reduksi menjadi matriks 5x5
Kp5 = Ypbus6(1:5,1:5);
Lp5 = Ypbus6(1:5,6);
Mp5 = Ypbus6(6,1:5);
Ypbus5 = Kp5 - Lp5*(1/Ypbus6(6,6))*Mp5;
%Reduksi menjadi matriks 4x4
Kp4 = Ypbus5(1:4,1:4);
Lp4 = Ypbus5(1:4,5);
Mp4 = Ypbus5(5,1:4);
Ypbus4 = Kp4 - Lp4*(1/Ypbus5(5,5))*Mp4;
%Reduksi menjadi matriks 3x3
Kp3 = Ypbus4(1:3,1:3);
Lp3 = Ypbus4(1:3,4);
Mp3 = Ypbus4(4,1:3);
Ypbus3 = Kp3 - Lp3*(1/Ypbus4(4,4))*Mp3;
Ybus_setelah = Ypbus3;

disp('=====')
disp('  Ketikkan Ybus_sebelum, Ybus_gangguan atau Ybus_setelah  ')
disp('    kemudian klik ENTER untuk mengetahui hasil reduksi    ')
disp('      matiks Ybus 3x3 gangguan saluran bus 8 dan 9        ')
disp('=====')

```

B. Listing Program CCA dan CCT

```

%=====
%==          PERHITUNGAN SUDUT DAN WAKTU PEMUTUS KRITIS          ==%
%==          MENGGUNAKAN METODE KRITERIA SAMA LUAS                ==%
%==          DAN RUNGE-KUTTA ORDE 4                              ==%
%=====
format short g
clc
clear all
%Reaktansi peralihan generator
Xd1 = j*0.0527;      Xd2 = j*0.0948;      Xd3 = j*0.1392;
%Tegangan terminal bus
V1 = 1.0400;      sdV1 = 0.00*pi/180;
V2 = 1.0250;      sdV2 = 1.89*pi/180;
V3 = 1.0250;      sdV3 = 5.13*pi/180;
%Pembangkitan pada generator
Pm1 = 1.0357;      Qg1 = j*0.2534;
Pm2 = 0.90;      Qg2 = j*-0.0133;
Pm3 = 1.25;      Qg3 = j*-0.1061;
%Konstanta inersia generator
M1 = 13.472;      M2 = 11.1499;      M3 = 5.960;
MT = M1+M2+M3;
%Arus yang mengalir dari bus 1, 2 dan 3
I1 = (Pm1 - Qg1)/conj(V1*(cos(sdV1)+j*sin(sdV1)));
I2 = (Pm2 - Qg2)/conj(V2*(cos(sdV2)+j*sin(sdV2)));
I3 = (Pm3 - Qg3)/conj(V3*(cos(sdV3)+j*sin(sdV3)));
%Tegangan peralihan pada masing - masing generator
E01 = V1*(cos(sdV1)+j*sin(sdV1))+Xd1*I1;
E02 = V2*(cos(sdV2)+j*sin(sdV2))+Xd2*I2;
E03 = V3*(cos(sdV3)+j*sin(sdV3))+Xd3*I3;
%Tegangan peralihan generator dan sudut dalam polar
E1 = abs(E01);      sdE1 = angle(E01);
E2 = abs(E02);      sdE2 = angle(E02);
E3 = abs(E03);      sdE3 = angle(E03);
%Selisih sudut
d12 = sdE1-sdE2;      d21 = sdE2-sdE1;      d31 = sdE3-sdE1;
d13 = sdE1-sdE3;      d23 = sdE2-sdE3;      d32 = sdE3-sdE2;
%=====
%
%                               SEBELUM GANGGUAN
%=====
%Matriks admitansi sebelum gangguan yang telah direduksi
Y11 = 0.8693 - 3.2273i;      Y12 = 0.2588 + 1.6503i;      Y21 = Y12;
Y22 = 0.4572 - 3.0667i;      Y23 = 0.2110 + 1.3235i;      Y32 = Y23;
Y13 = 0.1935 + 1.3556i;      Y33 = 0.3134 - 2.7053i;      Y31 = Y13;
%Daya masing - masing generator
P1 = Pm1-((E1^2)*real(Y11));
P2 = Pm2-((E2^2)*real(Y22));
P3 = Pm3-((E3^2)*real(Y33));
%Daya elektrik sebelum gangguan
Pe1 =
(E1*E2*imag(Y12)*sin(d12))+(E1*E2*real(Y12)*cos(d12))+(E1*E3*imag(
Y13)*sin(d13))+(E1*E3*real(Y13)*cos(d13));
Pe2 =
(E2*E1*imag(Y21)*sin(d21))+(E2*E1*real(Y21)*cos(d21))+(E2*E3*imag(
Y23)*sin(d23))+(E2*E3*real(Y23)*cos(d23));

```

```

Pe3 =
(E3*E1*imag(Y31)*sin(d31))+(E3*E1*real(Y31)*cos(d31))+(E3*E2*imag(
Y32)*sin(d32))+(E3*E2*real(Y32)*cos(d32));
=====
%
%                               SELAMA GANGGUAN
=====
%Matriks admitansi saat gangguan yang telah direduksi
Yf11=0.7503 - 4.0091i;   Yf12=0.1299 + 0.8871i;   Yf21=Yf12;
Yf22=0.3189 - 3.8116i;   Yf23=0;   Yf32=Yf23;
Yf13=0;   Yf33=0 - 5.0556i;   Yf31=Yf13;
%Daya masing - masing generator
P1f = Pm1-((E1^2)*real(Yf11));
P2f = Pm2-((E2^2)*real(Yf22));
P3f = Pm3-((E3^2)*real(Yf33));
%Daya elektrik saat gangguan
Pe1f =
(E1*E2*imag(Yf12)*sin(d12))+(E1*E2*real(Yf12)*cos(d12))+(E1*E3*ima
g(Yf13)*sin(d13))+(E1*E3*real(Yf13)*cos(d13));
Pe2f =
(E2*E1*imag(Yf21)*sin(d21))+(E2*E1*real(Yf21)*cos(d21))+(E2*E3*ima
g(Yf23)*sin(d23))+(E2*E3*real(Yf23)*cos(d23));
Pe3f =
(E3*E1*imag(Yf31)*sin(d31))+(E3*E1*real(Yf31)*cos(d31))+(E3*E2*ima
g(Yf32)*sin(d32))+(E3*E2*real(Yf32)*cos(d32));
%Daya Center of Angle PCOA
PCOaf = (P1f+P2f+P3f)-
(2*((E1*E2*real(Yf12)*cos(d12))+(E2*E3*real(Yf23)*cos(d23))));
%Daya percepatan generator
Pa1f = P1f-Pe1f-(M1*PCOaf/MT);
Pa2f = P2f-Pe2f-(M2*PCOaf/MT);
Pa3f = P3f-Pe3f-(M3*PCOaf/MT);
%Percepatan generator saat gangguan
a1f = Pa1f/M1;
a2f = Pa2f/M2;
a3f = Pa3f/M3;
%menentukan afmax
if (a1f>a2f>a3f); afmax = a1f; end
if (a2f>a1f>a3f); afmax = a2f; end
if (a3f>a2f>a1f); afmax = a3f; end
%alfa masing-masing geneartor
alfa1 = abs(a1f)/abs(afmax);
alfa2 = abs(a2f)/abs(afmax);
alfa3 = abs(a3f)/abs(afmax);
=====
%
%                               SETELAH GANGGUAN
=====
%Matriks admitansi setelah gangguan yang telah direduksi
Yp11=0.8579 - 3.2415i;   Yp12=0.2999 + 1.5711i;   Yp21=Yp12;
Yp22=0.7221 - 2.2555i;   Yp23=0.0506 + 0.3765i;   Yp32=Yp23;
Yp13=0.1275 + 1.3923i;   Yp33=0.3149 - 1.7416i;   Yp31=Yp13;
%Daya masing - masing generator
P1p = Pm1-((E1^2)*real(Yp11));
P2p = Pm2-((E2^2)*real(Yp22));
P3p = Pm3-((E3^2)*real(Yp33));
%Daya elektrik setelah gangguan

```

```

Pe1p =
(E1*E2*imag(Yp12)*sin(d12))+(E1*E2*real(Yp12)*cos(d12))+(E1*E3*ima
g(Yp13)*sin(d13))+(E1*E3*real(Yp13)*cos(d13));
Pe2p =
(E2*E1*imag(Yp21)*sin(d21))+(E2*E1*real(Yp21)*cos(d21))+(E2*E3*ima
g(Yp23)*sin(d23))+(E2*E3*real(Yp23)*cos(d23));
Pe3p =
(E3*E1*imag(Yp31)*sin(d31))+(E3*E1*real(Yp31)*cos(d31))+(E3*E2*ima
g(Yp32)*sin(d32))+(E3*E2*real(Yp32)*cos(d32));
%Daya Center of Angle PCOA
PCOAp = (P1p+P2p+P3p)-
2*((E1*E2*real(Yp12)*cos(d12))+((E2*E3*real(Yp23)*cos(d23))));
%Daya percepatan generator
Pa1p = P1p-Pe1p-(M1*PCOAp/MT);
Pa2p = P2p-Pe2p-(M2*PCOAp/MT);
Pa3p = P3p-Pe3p-(M3*PCOAp/MT);
%=====
%
% PARAMETER SISTEM OMIB
%=====
%Momen inersia mesin kritis, non kritis dan OMIB
Mc = M3;
Mn = M1+M2;
Momib = (Mc*Mn)/(Mc+Mn);
%Sudut rotor untuk mesin kritis, mesin non kritis dan OMIB
sdc = (1/Mc)*(M3*sdE3);
sdn = (1/Mn)*((M1*sdE1)+(M2*sdE2));
sd0 = sdc - sdn;
%Daya mekanik, daya elektrik dan daya percepatan OMIB
Pe = Momib*((Pe3)/Mc -((Pe1+Pe2) / Mn));
Pef = Momib*((Pe3f)/Mc -((Pe1f+Pe2f) / Mn));
Pep = Momib*((Pe3p)/Mc -((Pe1p+Pe2p) / Mn));
Pm = Momib*((P3)/Mc -((P1+P2) / Mn));
Pa = Pm - Pe;
Paf = Momib*((Pa3f)/Mc -((Pa1f+Pa2f) / Mn));
Pap = Momib*((Pa3p)/Mc -((Pa1p+Pa2p) / Mn));
%=====
%
% Menentukan Sudut Pemutus Kritis
%=====
Pmak = Pe/sin(sd0);
sdmak = pi-sd0;
r1 = Pef/Pe;
r2 = Pep/Pe;
sdcr = 180/pi*acos((Pm/Pmak*(sdmak-sd0)+ r2*cos(sdmak) -
r1*cos(sd0))/(r2-r1));
%Tampilkan daya
disp(' ')
disp('=====')
disp('== HASIL PERHITUNGAN DAYA DAN PERCEPATAN GENERATOR ==')
disp('=====')
disp('| DAYA | Generator 1 | Generator 2 | Generator 3 |')
disp('=====')
fprintf('|P prefault | %7.4f | %7.4f | %7.4f |')
fprintf('|P prefault | %7.4f | %7.4f | %7.4f |')
fprintf('|Pe prefault | %7.4f | %7.4f | %7.4f |')
disp('-----')

```



```

fprintf('|P faulted | %7.4f | %7.4f | %7.4f
|\n', P1f, P2f, P3f)
fprintf('|Pe faulted | %7.4f | %7.4f | %7.4f
|\n', Pe1f, Pe2f, Pe3f)
fprintf('|Pa faulted | %7.4f | %7.4f | %7.4f
|\n', Pa1f, Pa2f, Pa3f)
fprintf('|a faulted | %7.4f | %7.4f | %7.4f
|\n', alf, a2f, a3f)
fprintf('|af/amax | %7.4f | %7.4f | %7.4f
|\n', alfa1, alfa2, alfa3)
disp('-----')
fprintf('|P postfault | %7.4f | %7.4f | %7.4f
|\n', P1p, P2p, P3p)
fprintf('|Pe posfault | %7.4f | %7.4f | %7.4f
|\n', Pe1p, Pe2p, Pe3p)
fprintf('|Pa posfault | %7.4f | %7.4f | %7.4f
|\n', Pa1p, Pa2p, Pa3p)
disp('=====')
disp('')
disp('=====')
disp('= HASIL PERHITUNGAN DENGAN =')
disp('= METODE KRITERIA SAMA LUAS =')
disp('= DAN RUNGE-KUTTA ORDE 4 =')
disp('=====')
fprintf(' CCA = %7.4f derajat \n', sdcr);
%CCT dan plotting kurva
dt = 0.001;
sudut = sd0*180/pi;
omega = 0;
fo = 50;
H = Momib;
disp('=====')
disp(' WAKTU ! SUDUT ! OMEGA ')
disp(' (detik)! (derajat) ! (rad/detik)')
disp('=====')
for t = 0 : dt : 1
    waktu = t+dt;
    k1 = omega*dt;
    l1 = ((pi*fo/H)*(Pm-Pmak*r1*sin(sudut*pi/180)))*dt;
    k2 = (omega + 0.5*l1)*dt;
    l2 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r1*sin((sudut+(0.5*k1*180/pi))*pi/180)))*dt;
    k3 = (omega + 0.5*l2)*dt;
    l3 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r1*sin((sudut+(0.5*k2*180/pi))*pi/180)))*dt;
    k4 = (omega+l3)*dt;
    l4 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r1*sin((sudut+(k3*180/pi))*pi/180)))*dt;
    sudut = sudut + ((1/6)*((k1+2*k2+2*k3+k4)*180/pi));
    omega = omega + ((1/6)*(l1+2*l2+2*l3+l4));
    if (sudut>=sdcr)
        break
    end
end
disp('=====')
fprintf(' CCT = %7.3f detik \n', waktu);

```

```

disp('=====')
disp('Masukkan Waktu Pemutus untuk Menguji CCT')
cct = input('Waktu Pemutus = ');
disp('=====')
dt = 0.001;
sudut = sd0*180/pi;
omega = 0;
for t = 0 : dt : (cct-dt)
    k1 = omega*dt;
    l1 = ((pi*fo/H)*(Pm-Pmak*r1*sin(sudut*pi/180)))*dt;
    k2 = (omega + 0.5*l1)*dt;
    l2 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r1*sin((sudut+(0.5*k1*180/pi))*pi/180)))*dt;
    k3 = (omega + 0.5*l2)*dt;
    l3 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r1*sin((sudut+(0.5*k2*180/pi))*pi/180)))*dt;
    k4 = (omega+l3)*dt;
    l4 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r1*sin((sudut+(k3*180/pi))*pi/180)))*dt;
    fprintf('!%6.3f !%10.4f !%9.4f !\n',t,sudut,omega)
    sudut = sudut + ((1/6)*((k1+2*k2+2*k3+k4)*180/pi));
    xlim([0 3])
    ylim([-150 200])
    plot(t,sudut,'x')
    grid on
    title('Kurva Ayunan Sudut Rotor Waktu Pemutusan 0,328 detik')
    xlabel('waktu, detik')
    ylabel('sudut, derajat')
    hold on
    omega = omega + ((1/6)*(l1+2*l2+2*l3+l4));
end
disp('~~~~~Waktu Pemutus~~~~~')
for t = (cct+dt) : dt : 1.5
    k1 = omega*dt;
    l1 = ((pi*fo/H)*(Pm-Pmak*r2*sin(sudut*pi/180)))*dt;
    k2 = (omega + 0.5*l1)*dt;
    l2 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r2*sin((sudut+(0.5*k1*180/pi))*pi/180)))*dt;
    k3 = (omega + 0.5*l2)*dt;
    l3 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r2*sin((sudut+(0.5*k2*180/pi))*pi/180)))*dt;
    k4 = (omega+l3)*dt;
    l4 = ((pi*fo/H)*(Pm-
Pmak*r2*sin((sudut+(k3*180/pi))*pi/180)))*dt;
    fprintf('!%6.3f !%10.4f !%9.4f !\n',t,sudut,omega)
    sudut = sudut + ((1/6)*((k1+2*k2+2*k3+k4)*180/pi));
    plot(t,sudut,'x')
    grid on
    title('Kurva Ayunan OMIB Waktu Pemutus 0.328 detik')
    xlabel('waktu, detik')
    ylabel('sudut, derajat')
    hold on
    omega = omega + ((1/6)*(l1+2*l2+2*l3+l4));
end
disp('=====')

```

C. Aliran Daya IEEE 9 Bus Test System

Tabel 4.2 Data aliran daya IEEE 9 Bus Test System

Bus	Aliran daya									
Bus 1	BUS	1 Bus1	16.5	MW	Mvar	MVA	∅	1.0400	-0.00	1 1
	GENERATOR	1	103.57		25.34R	106.6				
	TO	4 Bus 4	1	103.57	25.34	106.6	0	1.0000	NT	0.0
Bus 2	BUS	2 Bus 2	18.0	MW	Mvar	MVA	∅	1.0250	1.89	1 1
	GENERATOR	1	90.00		-1.33R	90.0				
	TO	7 Bus 7	1	90.00	-1.33	90.0	0	1.0000	TA	0.0
Bus 3	BUS	3 Bus 3	13.8	MW	Mvar	MVA	∅	1.0250	5.13	1 1
	GENERATOR	1	125.00		-10.61R	125.4				
	TO	9 Bus 9	1	125.00	-10.61	125.4	0	1.0000	NT	0.0
Bus 4	BUS	4 Bus 4	230.0	MW	Mvar	MVA	∅	1.0276	-3.20	1 1
	TO	1 Bus1	1	-103.57	-19.29	105.3	0	1.0000	TA	0.0
	TO	5 Bus 5	1	73.23	18.02	75.4	0			
	TO	6 Bus 6	1	30.33	1.27	30.4	0			

Bus 5	BUS	5 Bus 5	230.0	MW	Mvar	MVA	Ø 1.0034	-5.82	1 1
	LOAD 1		125.00		50.00	134.6			
	TO	4 Bus 4	1	-72.65	-32.23	79.5	0		
	TO	7 Bus 7	1	-52.35	-17.77	55.3	0		
Bus 6	BUS	6 Bus 6	230.0	MW	Mvar	MVA	Ø 1.0143	-4.64	1 1
	LOAD 1		90.00		30.00	94.9			
	TO	4 Bus 4	1	-30.17	-16.86	34.6	0		
	TO	9 Bus 9	1	-59.83	-13.14	61.3	0		
Bus 7	BUS	7 Bus 7	230.0	MW	Mvar	MVA	Ø 1.0273	-1.17	1 1
	TO	2 Bus 2	1	-90.00	6.15	90.2	0	1.0000NT	0.0
	TO	5 Bus 5	1	53.22	-9.39	54.0	0		
	TO	8 Bus 8	1	36.78	3.25	36.9	0		
Bus 8	BUS	8 Bus 8	230.0	MW	Mvar	MVA	Ø 1.0182	-2.28	1 1
	LOAD 1		100.00		35.00	105.9			
	TO	7 Bus 7	1	-36.66	-18.03	40.9	0		
	TO	9 Bus 9	1	-63.34	-16.97	65.6	0		
Bus 9	BUS	9 Bus 9	230.0	MW	Mvar	MVA	Ø 1.0335	1.16	1 1
	TO	3 Bus 3	1	-125.00	19.38	126.5	0	1.0000TA	0.0
	TO	6 Bus 6	1	61.20	-18.30	63.9	0		
	TO	8 Bus 8	1	63.80	-1.09	63.8	0		

D. Data IEEE 9 Bus Test System**IEEE 9-BUS MODIFIED TEST SYSTEM DATA****Nomenclature**

Rated MVA	Machine-rated MVA; base MVA for impedances
Rated kV	Machine-rated terminal voltage in kV; base kV for impedances
H	Inertia constant in s
D	Machine load damping coefficient
r_a	Armature resistance in p.u.
x_d	Unsaturated d axis synchronous reactance in p.u.
x_q	Unsaturated q axis synchronous reactance in p.u.
x'_d	Unsaturated d axis transient reactance in p.u.
x'_q	Unsaturated q axis transient reactance in p.u.
x''_d	Unsaturated d axis subtransient reactance in p.u.
x''_q	Unsaturated q axis subtransient reactance in p.u.
x_l or x_p	Leakage or Potier reactance in p.u.
T'_{d0}	d axis transient open circuit time constant in s
T'_{q0}	q axis transient open circuit time constant in s
T''_{d0}	d axis subtransient open circuit time constant in s
T''_{q0}	q axis subtransient open circuit time constant in s
$S(1.0)$	Machine saturation at 1.0 p.u. voltage in p.u.
$S(1.2)$	Machine saturation at 1.2 p.u. voltage in p.u.
T_r	Regulator input filter time constant in s
K_a	Regulator gain (continuous acting regulator) in p.u.
T_a	Regulator time constant in s
V_{Rmax}	Maximum regulator output, starting at full load field voltage in p.u.
V_{Rmin}	Minimum regulator output, starting at full load field voltage in p.u.
K_e	Exciter self-excitation at full load field voltage in p.u.
T_e	Exciter time constant in s
K_f	Regulator stabilizing circuit gain in p.u.
T_f	Regulator stabilizing circuit time constant in s
E_1	Field voltage value,1 in p.u.
$SE(E_1)$	Saturation factor at E_1
E_2	Field voltage value,2 in p.u.
$SE(E_2)$	Saturation factor at E_2
P_{max}	Maximum turbine output in p.u.
R	Turbine steady-state regulation setting or droop in p.u.
T_1	Control time constant (governor delay) in s
T_2	Hydro reset time constant in s
T_3	Servo time constant in s
T_4	Steam valve bowl time constant in s
T_5	Steam reheat time constant in s
F	Shaft output ahead of reheater in p.u.

TABLE I
IEEE 9-BUS MODIFIED TEST SYSTEM MACHINE DATA

Type	GENROU	GENROU	GENROU
Operation	Sync. Gen.	Sync. Gen.	Sync. Gen.
Default Unit no. (New Unit no.)	1(12)	2(10)	3(11)
Rated power (MVA)	512	270	125
Rated voltage (kV)	24	18	15.5
Rated pf	0.9	0.85	0.85
H (s)	2.6312	4.1296	4.768
D	2.000	2.000	2
r_a (p.u)	0.004	0.0016	0.004
x_d (p.u)	1.700	1.700	1.220
x_q (p.u)	1.650	1.620	1.160
x'_d (p.u)	0.270	0.256	0.174
x'_q (p.u)	0.470	0.245	0.250
x''_d (p.u)	0.200	0.185	0.134
x''_q (p.u)	0.200	0.185	0.134
x_l or x_p (p.u)	0.160	0.155	0.0078
T'_{d0} (s)	3.800	4.800	8.970
T'_{q0} (s)	0.480	0.500	0.500
T''_{d0} (s)	0.010	0.010	0.033
T''_{q0} (s)	0.0007	0.0007	0.070
$S(1.0)$	0.090	0.125	0.1026
$S(1.2)$	0.400	0.450	0.432

TABLE II
IEEE 9-BUS MODIFIED TEST SYSTEM EXCITER DATA

Type	IEEET1	IEEET1	IEEET1
Default Unit no. (New Unit no.)	1(12)	2(10)	3(11)
Rated power (MVA)	512	270	125
Rated voltage (kV)	24	18	15.5
T_r (s)	0.000	0.000	0.060
K_a (p.u)	200	30	25
T_a (s)	0.395	0.400	0.200
V_{Rmax} (p.u)	3.840	4.590	1.000
V_{Rmin} (p.u)	-3.840	-4.590	-1.000
K_e (p.u)	1.000	-0.020	-0.0601
T_e (s)	0.000	0.560	0.6758
K_f (p.u)	0.0635	0.050	0.108
T_f (s)	1.000	1.300	0.350
E_1 (p.u)	2.880	2.5875	2.4975
$SE(E_1)$	0.000	0.7298	0.0949
E_2 (p.u)	3.840	3.450	3.330
$SE(E_2)$	0.000	1.3496	0.37026

TABLE III
IEEE 9-BUS MODIFIED TEST SYSTEM GOVERNOR DATA

Type	BPA_GG	BPA_GG	BPA_GG
Default Unit no. (New Unit no.)	1(12)	2(10)	3(11)
Rated power (MVA)	512	270	125
Rated voltage (kV)	24	18	15.5
P_{max} (p.u)	0.8984	0.8518	1.056
R (p.u)	0.00976	0.01852	0.040
T_1 (s)	0.150	0.100	0.083
T_2 (s)	0.050	0.000	0.000
T_3 (s)	0.300	0.259	0.200
T_4 (s)	0.260	0.100	0.050
T_5 (s)	8.000	10.000	5.000
F	0.270	0.272	0.280