ABSTRAK

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN REAKTANSI SALURAN TERHADAP *TRANSIENT STABILITY OF MULTI-MACHINE* DENGAN METODE RUNGE-KUTTA FEHLBERG

Oleh

PETRUS PRASETYO

Keandalan sistem tenaga listrik dalam menjaga dan mempertahankan kontinuitas distribusi tenaga listrik, berkaitan dengan kestabilannya dalam menjaga *synchronism* generator ketika terjadi gangguan. Studi stabilitas transien (*transient stability*) berhubungan dengan gangguan-gangguan besar seperti surja hubung, hubung singkat, lepasnya beban atau lepasnya generator. Gangguan-gangguan ini sangat mempengaruhi sistem secara keseluruhan karenanya perlu adanya studi *transient stability*.

Ada berbagai metode yang digunakan dalam analisis kestabilan diantaranya adalah metode *Runge-Kutta Fehlberg*. Metode ini merupakan salah satu metode *Time Domain Simulation* (TDS) yang digunakan pada penelitian ini karena mampu meningkatkan akurasi dalam penyelesaian persamaan ayunan (*swing-equation*) sistem multimesin IEEE 9 bus.

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari dan menganalisis pengaruh perubahan reaktansi saluran terhadap *transient stability* dengan menerapkan gangguan lepasnya beban dan gangguan 3 fasa simetris yang terjadi pada salah satu saluran.

Hasil simulasi menunjukkan kompensasi seri saluran dan penambahan jumlah saluran transmisi mampu menurunkan reaktansi saluran sehingga meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik. Selanjutnya, diperoleh *Critical Clearing Time* (CCT) dengan gangguan 3 fasa simetris adalah 0.19-0.20s. Dengan kompensasi 30%, 50% dan 70% diperoleh CCT berturut-turut 0.20-0.21s, 0.21-0.22s dan 0.22-0.23s. Ketika penambahan jumlah saluran, diperoleh CCT sebesar 0.21-0.22s. Sedangkan lokasi gangguan hilangnya beban memberikan ayunan sudut rotor generator terdekat menjadi lebih besar dibandingkan dengan generator yang berada jauh dari lokasi terjadinya lepas beban.

Kata kunci: Keandalan, *Transient Stability*, *Runge-Kutta Fehlberg*, *Time Domain Simulation* (TDS), *Critical Clearing Time* (CCT), sistem IEEE 9 bus.

ABSTRACT

ANALYSIS THE INFLUENCE OF LINE REACTANCE CHANGING TO TRANSIENT STABILITY OF MULTI-MACHINE USING RUNGE-KUTTA FEHLBERG METHOD

By

PETRUS PRASETYO

The reliability of power system energy in maintaining the continuity of electricity distribution is related to its power system stability on keeping and maintaining the synchronism of generators when the disturbances occur.
Transient stability is related to large disturbances such as lighting, short circuit, loss of loads or loss of generations. These disturbances influence the whole system, so study of transient stability is needed.
There are some methods that have been used in stability analysis, one of them is Runge-Kutta Fehlberg method. This method is one of Time Domain Simulation (TDS) method which is used in this research to increase the accuration of solving the swing equation of IEEE 9 buses system.
The purpose of this research is to study and investigate the influence of line reactance changing to transient stability by applying loss of loads and 3 phase fault at one of transmission lines
The results show that addition of line series compensation and parallel lines transmission were able to decrease line reactances, so the stability of power system was improved. Furthermore, the critical clearing time (CCT) was reached on 0.19-0.20s while 3 phase fault was applied on transmission line. By series compensation: 30%, 50% and 70%, CCT was reached on 0.20-0.21s, 0.21-0.22s and 0.22-0.23s. Whereas, by applying the parallel lines reached the CCT on 0.21-0.22s. In addition, the closest generator to the loss of loads disturbance has higher rotor angle swing than the generator located far away from the disturbance.

Key words: *Reliability*, *Transient Stability*, *Runge-Kutta Fehlberg*, *Time Domain Simulation*(TDS), *Critical Clearing Time*(CCT), IEEE 9 *buses system*.

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN REAKTANSI SALURAN TERHADAP *TRANSIENT STABILITY OF MULTI-MACHINE* DENGAN METODE RUNGE-KUTTA FEHLBERG

(Skripsi)

Oleh

PETRUS PRASETYO

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN REAKTANSI SALURAN TERHADAP *TRANSIENT STABILITY OF MULTI-MACHINE* DENGAN METODE RUNGE-KUTTA FEHLBERG

Oleh

Petrus Prasetyo

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung

FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016

Judul Skripsi : **ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN REAKTANSI SALURAN TERHADAP *TRANSIENT STABILITY OF MULTI-MACHINE* DENGAN METODE RUNGE-KUTTA FEHLBERG**

Nama Mahasiswa : Petrus Prasetyo

Nomor Pokok Mahasiswa : 1115031065

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T.	**Herri Gusmedi, S.T., M.T.**
NIP 19720428 199803 2 001	NIP 19710813 199903 1 003

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro

Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.
NIP 19731128 199903 1 005

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T.** .....

Sekretaris : **Herri Gusmedi, S.T., M.T.** .....

Penguji
Bukan Pembimbing : **Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.** .....

2. Dekan Fakultas Teknik

Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **11 Maret 2016**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan oleh orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan di dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandarlampung, 18 April 2016

METERAI TEMPEL

6000

Petrus Prasetyo

1115031065

RIWAYAT HIDUP

Penulis merupakan buah hati ke-lima dari delapan bersaudara. Penulis dilahirkan dari pasangan Bapak Simon Kuwat Santoso (Alm) dan Ibu Suminah di Jatimulyo, Kabupaten Lampung Selatan pada tanggal 17 September 1990.

Penulis memulai pendidikan formal di SDN 5 Jatimulyo, Lampung Selatan pada tahun 2002-2003, kemudian melanjutkan pendidikan di SMP Pangudi Luhur Tanjung Senang, Bandar Lampung pada tahun 2003-2006. Setelah itu, penulis menyelesaikan sekolah menengah atas di SMAN 5 Sukarame, Bandar Lampung pada tahun 2006-2009 dan diterima sebagai mahasiswa di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung pada tahun 2011 melalui jalur Penerimaan Mahasiswa Perluasan Akses Pendidikan (PMPAP).

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di Organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro sebagai anggota Departemen Pendidikan dan Pengkaderan pada periode 2012-2013 dan Kepala Divisi Ekonomi di Departemen Sosial dan Ekonomi pada periode 2013-2014. Penulis juga pernah menjadi Asisten Mata Kuliah dan Asisten Praktikum di Laboratorium Teknik Pengukuran Besaran Elektrik Jurusan Teknik Elektro pada tahun 2012-2014.

Penulis telah melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. Energy Management Indonesia (EMI) selama satu bulan dan menyelesaikannya dengan menulis sebuah laporan yang berjudul: “Tata Udara dan Cahaya Sebagai Bagian Audit Energi Gedung A Fakultas Tenik Universitas Lampung”.

"Diberkatilah orang yang mengandalkan Tuhan yang menaruh harapannya pada Tuhan".
(Yeremia 17:7)

First, think.
Second, believe.
Third, dream.
And finally, dare.

~Walt Disney~

"Pikiranmu menentukan hidupmu, so think wisely". (Peter)

Kupersembahkan Skripsi ini untuk:
Ayahanda dan Ibunda Tercinta,

Simon Kuwat Santoso (Alm)

&

Suminah

yang telah menjadi motivasi, inspirasi dan teladan hidup serta yang tiada henti memberikan doamu untukku,

Keluargaku

atas dukungan dan semangat kalian semua,

Elevengineer

Yang telah menjadi keluarga baruku.

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas segala hikmat, anugerah, pertolongan dan kasih karunia-Nya yang selalu dilimpahkan kepada penulis. Sehingga penulis dapat mengerjakan dan menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul *"Analisis Pengaruh Perubahan Reaktansi Saluran Terhadap Transient Stability of Multimachine dengan Metode Runge-Kutta Fehlberg"*. Laporan Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Selama menempuh pendidikan dan penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis mendapatkan bantuan pemikiran serta dorongan moril dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Suharno, M.S, M.Sc, Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik.
2. Bapak Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro.
3. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Elektro.
4. Ibu Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T. sebagai Pembimbing Utama, yang telah meluangkan waktunya untuk memberi arahan, bimbingan, saran, nasihat serta kritikan yang bersifat membangun dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.

5. Bapak Herri Gusmedi S.T., M.T. selaku Pembimbing Kedua, yang telah meluangkan waktunya untuk memberi arahan, bimbingan, saran, nasihat serta kritikan yang bersifat membangun dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc. selaku Penguji Utama, yang telah memberikan masukan, nasihat, saran serta kritikan yang bersifat membangun dalam Tugas Akhir ini.
7. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung, atas pengajaran dan bimbingannya yang telah diberikan kepada penulis selama menjadi mahasiswa Teknik Elekto Universitas Lampung.
8. Mbak Ning, Mbak Dian, Mas Daryono dan seluruh jajarannya atas semua bantuannya dalam menyelesaikan urusan administrasi di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
9. Kedua orang tua penulis, Bpk. Simon Kuwat Santoso (Alm) dan Ibu Suminah yang sangat penulis banggakan karena telah mendidik, mengajarkan banyak hal dan menjadi teladan serta motivasi hidup kepada penulis.
10. Mbak Inggar Rumekti dan Bang Natal Sitorus sekeluarga, Mas Elly Manuel, Mas Saul Yuliono, Mas Lukas Pranoto, Adek Kiyat Korintus, Adek K. Meyas C, dan si bungsu Jeremiaty M.C. yang telah memberikan motivasi, kasih sayang, dukungan moral dan *financial* selama penulis menyelesaikan pendidikan.
11. Keluarga besar “Elevengineer 2011” dan teman berbagi cerita: Yeremia Luhur, Frian Daniel, Richard Manuel, Febry Ramos Sinaga, Rani Kusuma Dewi, Fanny Simatupang, Eliza Hara, Yunita, Ocik, Jul, Nurhayati, Alin, Annida, Yoga Putra, Deden H, Reza Naufal, dan Bang M. Cahyadi, S.T.

12. Teman seperjuangan “Vina Aprilia”, sebagai teman senasib dan sepenanggungan yang selalu berjuang bersama dalam mengerjakan Tugas Akhir ini dan menjadi pendengar setia dalam segala bentuk curahan hati di kehidupan sehari-hari.
13. Semua rekan asisten Laboratorium Teknik Pengukuran Besaran Elektrik (PBE), Kak Eko Susanto, S.T., Bang Jumanto S, S.T., Ayu, S.T, Anwar Solihin, S.T., Derry Ferdiansyah, S.T., Ahmad Surya A, S.T., Muthmainah, S.T., Kiki Apriliya, Oka Kurniawan, S.T., Adek-adek 2013 (Ikrom, Rasyid, Riza, Citra, Ubaidah, Yona, Niken, Nurul), Teknisi (Mas Makmur Santosa) beserta staff Laboratorium PBE yang selalu memberi motivasi dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, terimakasih untuk doa dan dukungannya.
14. Teman-teman seperjuangan konsentrasi SEE (Adit jawa, Apriwan Rizki, Habib, Rejani, S.T., Fikri, Andi, Edi, Alex, S.T., Hajri, Najib, Mariyo, Andreas, Gusmau Rado P, S.T. dan kawan-kawan SIE dan SKI tidak dapat disebutkan satu per satu)
15. Rosdiana Matcik dan keluarga, Helen B.S dan Elsye S yang telah memberikan motivasi, doa dan dukungan kepada penulis dalam pengerjaan Tugas Akhir ini.
16. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah membantu serta mendukung penulis dari awal kuliah sampai dengan terselesaikannya Tugas Akhir ini.
17. Almamater tercinta, atas kisah hidup yang penulis dapatkan semasa kuliah.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan dan semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Tuhan memberkati!

Bandar Lampung, Maret 2016

Penulis,

Petrus Prasetyo

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK i

DAFTAR ISI xiv

DAFTAR GAMBAR xvi

DAFTAR TABEL DAN GRAFIK xix

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah 1
1.2. Tujuan 3
1.3. Manfaat Penelitian 3
1.4. Rumusan Masalah 4
1.5. Batasan Masalah 5
1.6. Sistematika Penulisan 5

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Stabilitas Sistem Tenaga (*Power System Stability*) 7
2.2. *Rotor Angle Stability* 8
2.3. *Frequency Stability* 10
2.4. *Voltage Stability* 11
2.5. Teknik Analisa dalam Kestabilan Transien 12
2.6. Studi Kestabilan Transien 13
2.7. Persamaan Ayunan (*Swing Equation*) 15
2.8. CCT (*Critical Clearing Time*) 20
2.9. Stabilitas Peralihan (*Transient*) Mesin Majemuk (*Multimachine*) 21
2.10. Reduksi Matriks (Kron *Reduction*) 24
2.11. Sistem Per Unit 26
2.12. Runge-Kutta Fehlberg 27
2.13. Pengurangan Reaktansi Saluran Transmisi 27
2.13.1. Kompensasi Seri 28
2.13.2. Penambahan Jumlah Saluran Transmisi 29
2.14. Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus 29

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian 31

3.2. Alat dan Bahan 31
3.3. Tahap Pembuatan Tugas Akhir 32
3.4. Diagram Alir Penelitian 34

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pemodelan Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus 38
4.2. Pengambilan Data 39
4.3. Pengolahan Data 39
4.4. Perhitungan *Initial Value* Sebagai Kondisi *Steady State* 41
4.5. Pengujian Program Simulasi 42
4.6. Kurva Ayunan Sistem IEEE 9 Bus dengan Metode RK Fehlberg 46
4.6.1. Sebelum Pemberian Kompensasi Saluran 46
4.6.2. Pengaruh Penambahan Kompensasi Saluran Terhadap Kestabilan Sistem 49
4.6.3. Pengaruh Penambahan Jumlah Saluran Terhadap Kestabilan Sistem 62
4.6.4. Pengaruh Lepasnya Beban Terhadap Kestabilan Sistem 66
4.7. Kestabilan Sistem IEEE 9 Bus 68
4.8. Pengaruh Perubahan Inersia (H) 70
4.9. Grafik Hubungan Delta Vs Omega 74

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan 77
5.2. Saran 78

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga 8

Gambar 2.2 Aliran daya mekanik dan elektrik dalam sebuah mesin Sinkron . 15

Gambar 2.3 Grafik terhadap *t* untuk sistem *stable* dan *unstable* 19

Gambar 2.4 Tipe kurva ayunan untuk generator..... 19

Gambar 2.5 Karakteristik 20

Gambar 2.6 Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus..... 30

Gambar 3.1. Diagram Alir Penyelesaian Kurva Ayunan..... 35

Gambar 3.2. Diagram Alir Penyusunan Laporan Penelitian..... 36

Gambar 4.1. Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus..... 38

Gambar 4.2. Waktu pemutusan gangguan saat 0.20 detik 43

Gambar 4.3. Waktu pemutusan gangguan saat 0.21 detik 43

Gambar 4.4. Waktu pemutusan gangguan saat 0.20 detik 44

Gambar 4.5. Waktu pemutusan gangguan saat 0.21 detik 44

Gambar 4.6. Kurva ayunan dengan waktu pemutusan gangguan 0.18 detik ... 47

Gambar 4.7. Kurva ayunan dengan waktu pemutusan gangguan 0.19 detik ... 47

Gambar 4.8. Kurva ayunan dengan waktu pemutusan gangguan 0.20 detik ... 48

Gambar 4.9. Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 20% saat pemutusan gangguan 0.19 detik 49

Gambar 4.10. Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 20% saat

pemutusan gangguan 0.20 detik 50

Gambar 4.11.Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 30% saat pemutusan gangguan 0.20 detik 51

Gambar 4.12.Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 30% saat pemutusan gangguan 0.21 detik 52

Gambar 4.13.Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 40% saat pemutusan gangguan 0.20 detik 52

Gambar 4.14.Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 40% saat pemutusan gangguan 0.21 detik 53

Gambar 4.15.Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 50% saat pemutusan gangguan 0.21 detik. 54

Gambar 4.16. Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 50% saat pemutusan gangguan 0.22 detik 55

Gambar 4.17. Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 60% saat pemutusan gangguan 0.21 detik 55

Gambar 4.18. Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 60% saat pemutusan gangguan 0.22 detik 56

Gambar 4.19. Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 70% saat pemutusan gangguan 0.22 detik 57

Gambar 4.20. Kurva ayunan dengan penambahan kompensasi 70% saat pemutusan gangguan 0.23 detik 58

Gambar 4.21a.Kurva Ayunan Ketika Kompensasi 20-40 % dengan Waktu Pemutusan 0.19 detik 60

Gambar 4.21b.Kurva Ayunan Ketika Kompensasi 50-70 % dengan Waktu

Pemutusan 0.19 detik 61

Gambar 4.22. Rangkaian Sistem IEEE 9 Bus dengan Konfigurasi Jaringan Baru 63

Gambar 4.23.Kurva Ayunan Penambahan Saluran Saat Pemutusan Gangguan 0.21 detik 64

Gambar 4.24. Kurva Ayunan Penambahan Saluran Saat Pemutusan Gangguan 0.22 detik 64

Gambar 4.25. Perbedaan Swing Curve Sebelum dan Setelah Dilakukan Penambahan Saluran Saat Pemutusan Gangguan 0.19 detik 65

Gambar 4.26. Kurva Ayunan Gangguan Lepas Beban 66

Gambar 4.27.Kurva Ayunan Pengujian 1. 72

Gambar 4.28.Kurva Ayunan Pengujian 2 72

Gambar 4.29.Kurva Ayunan Pengujian 3. 73

Gambar 4.30.Kurva Ayunan Pengujian 4. 73

Gambar 4.31.*Trajectory* gangguan 3 fasa saluran 8-9 kondisi stabil..... 75

Gambar 4.32.*Trajectory* gangguan 3 fasa saluran 8-9 kondisi tidak stabil..... 75

DAFTAR TABEL DAN GRAFIK

Halaman

Tabel 4.1. Perbandingan Hasil Pengujian Kompensasi Saluran 59

Tabel 4.2. Data Saluran yang Ditambahkan pada Sistem IEEE 9 Bus 63

Tabel 4.3. Perbandingan Sudut Rotor Ayunan Pertama Maksimum Sebelum dan Setelah Penambahan Saluran Saat Waktu Pemutusan 0.19s 66

Tabel 4.4. Data Pengujian Hilangnya Beban 67

Tabel 4.5. Perbandingan Jenis Pengujian terhadap Waktu Pemutusan Kritis Gangguan 69

Tabel 4.6. Pengujian Perubahan Inersia H 71

Grafik 4.1. Perbandingan Perubahan Maksimum dengan Penambahan Kompensasi Saluran pada *First Swing* Ketika Waktu Pemutusan Gangguan (t=0.19 detik) 62

Grafik 4.2. Hubungan antara H terhadap CCT 74

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Sistem tenaga listrik (*power system energy*) terdiri dari 3 komponen utama, yaitu: sistem pembangkit, transmisi dan distribusi tenaga listrik. Ketiga komponen tersebut harus selalu terjaga keandalannya. Sistem tenaga listrik dapat dikatakan andal jika sistem tersebut mampu menjaga dan mempertahankan kontinuitas pendistribusian tenaga listrik kepada konsumen dari berbagai gangguan (*disturbances*).

Keandalan dalam sistem tenaga listrik (STL) berkaitan dengan kestabilan sistem tersebut. Sehingga dalam perencanaan, pengembangan maupun pengoperasian sistem tenaga listrik yang andal, sangat berhubungan dengan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk beroperasi dalam keadaan normal kembali setelah mengalami gangguan.

Menurut Das D (2006) dan R Murty (2007), studi kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3, yaitu: *steady state stability*, *dinamic stability* dan *transient stability*. *Steady state stability* merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali pada kondisi sinkron setelah terjadi gangguan-gangguan kecil (*small disturbances*) dan perluasan dari studi *steady state stability* adalah *dinamic stability*. Sedangkan *transient stability*/kestabilan peralihan merupakan

kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan keserempakan generator (*synchronism of generators*) ketika terjadi gangguan-gangguan besar seperti adanya pemberian beban secara tiba-tiba, hilangnya beban yang besar, lepasnya generator, gangguan pada saluran transmisi maupun akibat surja hubung.

Apabila gangguan besar pada kestabilan peralihan ini tidak dilakukan tindakan antisipatif maka dapat mengakibatkan pemadaman total (*blackout*) dalam operasi sistem tenaga listrik. Oleh karena itu perlu adanya studi mengenai kestabilan peralihan dan peningkatan stabilitas peralihan ini.

Studi kestabilan peralihan berkaitan dengan CCT (*Critical Clearing Time*). CCT merupakan waktu pemutusan kritis yang diperlukan oleh sistem/generator untuk dapat tetap mempertahankan *synchronism* atau kestabilannya.

Permasalahan kestabilan peralihan juga berhubungan dengan reaktansi saluran transmisi. Pengurangan reaktansi saluran transmisi mampu meningkatkan stabilitas peralihan dengan menaikkan transfer daya[4]. Metode tambahan yang digunakan untuk mengurangi reaktansi jaringan adalah dengan menambahkan kompensator kapasitor seri pada saluran transmisi serta menambah jumlah saluran transmisi.

Penelitian ini adalah analisis pengaruh pemasangan kompensator kapasitor seri dan penambahan jumlah saluran transmisi terhadap kestabilan peralihan pada sistem tenaga listrik multimesin (sistem IEEE 9 bus).

Pemodelan matematis sistem tenaga listrik dengan gangguan besar (*large disturbances*)/transien adalah dalam bentuk persamaan *non-linier*. Sehingga penyelesaian numerik dari persamaan ini menggunakan penyelesaian secara integrasi. Pemilihan metode Runge-Kutta Fehlberg sebagai metode penyelesaian

numerik dari persamaan ayunan (*swing equation*) guna mendapatkan dan meningkatkan akurasi kurva ayunan (*swing curve*) dalam penyelesaian persamaan *non-linier* ini.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mempelajari *transient stability* mesin majemuk (*multimachine*) dan mengetahui kurva ayunan (*swing curve*) untuk menggambarkan stabilitas/ *synchronism* pada masing-masing generator dengan menggunakan metode Runge-Kutta Fehlberg.
2. Mengetahui dan mendapatkan waktu pemutusan kritis gangguan pada sistem IEEE 9 bus dengan pemberian gangguan 3 fasa simetris dan hilangnya beban secara tiba-tiba.
3. Mengetahui pengaruh pemasangan kompensator kapasitor seri dan penambahan jumlah saluran transmisi terhadap stabilitas peralihan pada sistem IEEE 9 bus.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Mendapatkan kurva ayunan (*swing curve*) untuk masing-masing generator/mesin.
2. Mendapatkan waktu pemutusan kritis gangguan (*Critical Clearing Time*-CCT) dari sistem tenaga listrik yang akan berguna untuk perancangan sistem proteksi.

3. Mendapatkan pengaruh perubahan reaktansi saluran transmisi dengan menambah pemasangan kompensator kapasitor seri dan jumlah saluran transmisi terhadap stabilitas peralihan sistem tenaga listrik.
4. Dapat mengetahui karakteristik stabilitas sistem dari beberapa gangguan peralihan yang dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam perencanaan pembangunan pembangkit listrik baru.

1.4. Rumusan Masalah

Penentuan kestabilan peralihan sistem multimesin dapat dilihat dengan mengamati keserempakan (*synchronism*) mesin pada kurva ayunan (*swing curve*), yaitu dengan menentukan waktu pemutusan kritis gangguan (*Critical Clearing Time*). Reaktansi saluran transmisi sangat mempengaruhi stabilitas peralihan dalam sistem tenaga listrik. Pemasangan kompensator kapasitor seri/pemberian kompensasi serta penambahan jumlah saluran transmisi diharapkan mampu mengurangi reaktansi saluran dan membantu meningkatkan stabilitas peralihan sistem tersebut.

Pada penelitian dapat diketahui pengaruh pemasangan kompensator kapasitor seri dan penambahan jumlah saluran transmisi terhadap stabilitas peralihan dengan menentukan waktu pemutusan kritis gangguan. Analisis stabilitas peralihan dengan pemasangan kompensator kapasitor seri dan penambahan jumlah saluran transmisi akan menerapkan gangguan 3 fasa simetris pada salah satu saluran transmisi dan hilangnya beban secara tiba-tiba.

Analisis dilakukan dengan mengamati waktu terlama yang dibutuhkan oleh mesin sinkron untuk dapat mempertahankan keserempakannya (*synchronism*).

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sistem tenaga listrik multi mesin yang digunakan adalah sistem IEEE 9 bus dengan 3 buah mesin/generator.
2. Penentuan waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) dengan variasi gangguan besar pada sistem tenaga listrik IEEE 9 bus.
3. Gangguan besar yang diujikan pada penelitian ini adalah hilangnya beban secara tiba-tiba dan gangguan 3 fasa simetris pada saluran transmisi 8-9 dekat dengan bus 9.
4. Metode numerik yang digunakan untuk penyelesaian *swing equation* adalah metode Runge-Kutta Fehlberg.
5. Tidak membahas aliran daya pada sistem IEEE 9 bus.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika dalam penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Pendahuluan ini berisi latar belakang dan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, rumusan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka ini menjelaskan dan memaparkan uraian umum mengenai materi terkait dengan studi kestabilan transien (*transient stability*) yang meliputi: kestabilan sistem tenaga listrik, *swing equation*, *swing curve* dan metode numerik Runge-Kutta Fehlberg.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi mengenai langkah-langkah dan persiapan dalam pelaksanaan penelitian, yaitu waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan, tahapan penelitian dan diagram alir penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi mengenai hasil penelitian dan pembahasan yang meliputi pengujian program simulasi, hasil simulasi *swing curve* sistem IEEE 9 bus dengan menerapkan gangguan 3 fasa simetris pada saluran 8-9 dekat bus 9, pelepasan beban, pemberian kompensasi dan penambahan jumlah saluran. Berikutnya membahas hal-hal yang menjadi tujuan dalam penelitian ini.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan dan saran mengenai hasil penelitian yang telah dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

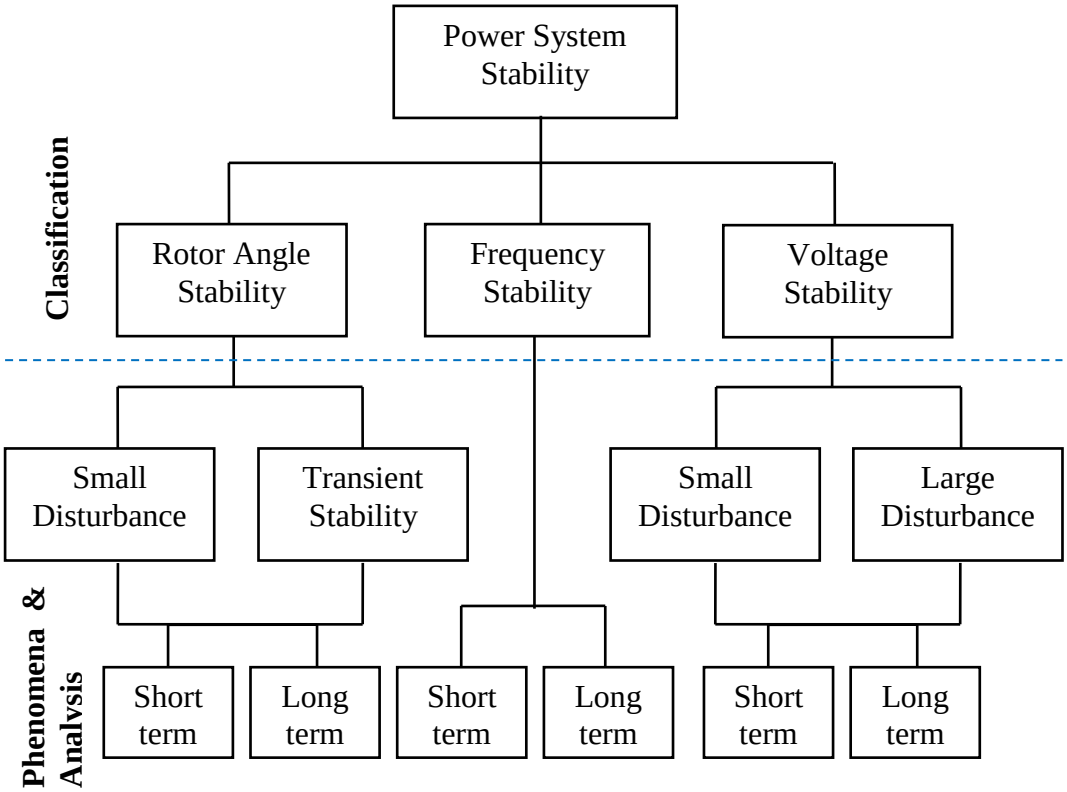
2.1. Stabilitas Sistem Tenaga (*Power System Stability*)

Dalam sistem tenaga listrik (STL) terdiri dari 3 komponen utama yang harus dijaga keandalannya, yaitu: sistem pembangkit, sistem transmisi dan sistem distribusi[1],[2].

Keandalan (*reliability*), kualitas (*quality*) dan stabilitas (*stability*) adalah hal terpenting yang harus dipenuhi dalam suatu sistem tenaga listrik yang baik. *Reliability* merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menyalurkan energi listrik secara kontinyu. *Quality* merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran listrik (tegangan, frekuensi) yang sesuai dengan standart yang telah ditetapkan. Sedangkan sistem tenaga listrik yang mampu mengembalikan keadaan sistem pada kondisi kerja/operasi normal setelah mengalami suatu gangguan merupakan suatu sistem tenaga yang dikatakan stabil. Sistem yang tidak stabil (*instability*) yaitu kondisi sistem tenaga listrik dimana mesin/generator sinkron kehilangan keserempakannya akibat satu atau lebih generator lepas karena terjadi gangguan. Kondisi ini juga dapat dikatakan sebagai kondisi *out of step* [26].

Permasalahan stabilitas berfokus pada perilaku dari mesin/generator sinkron setelah mengalami gangguan. Stabilitas sistem tenaga diklasifikasikan menjadi 3

jenis, yaitu: stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan seperti terlihat pada gambar 2.1. dibawah ini.



Gambar 2.1 Klasifikasi Stabilitas Sistem Tenaga[3]

2.2. *Rotor Angle Stability*

Rotor angle stability atau stabilitas sudut rotor adalah kemampuan suatu generator/mesin sinkron yang terhubung dalam sistem tenaga untuk menjaga keserempakannya (*synchronism*) di bawah kondisi operasi normalnya setelah mengalami gangguan[4]. Dalam sistem tenaga, sudut rotor (dan kecepatan (dari generator sinkron merupakan kuantitas terpenting.

Stabilitas ini bergantung pada kemampuan dari masing-masing mesin sinkron dalam sistem tenaga untuk mempertahankan keseimbangan antara masukan generator (*mechanical torque*) dan keluaran generator (*electrical torque*).

Perubahan dalam *electrical torque* pada sebuah mesin sinkron mengikuti sebuah gangguan yang dapat dibagi ke dalam 2 komponen. Kedua komponen ini yaitu *synchronous torque* dan *electrical torque* yang biasa digunakan untuk studi kestabilan[5].

.....2.1)

..... 2.2)

Pada persamaan 2.1 dan 2.2, bentuk berhubungan dengan *synchronizing torque* dan menentukan perubahan putaran dalam fasa dengan gangguan sudut rotor . Sedangkan bentuk mewakili *damping torque* , yang menentukan perubahan *torque* dalam fasa dengan selisih kecepatan. Oleh karena itu, dan berhubungan dengan koefisien *synchronizing torque* dan koefisien *damping torque*. Untuk semua mesin/generator sinkron dalam sistem tenaga, stabilitas sudut rotor bergantung pada kedua komponen tersebut.

Fenomena dan analisis dalam stabilitas sudut rotor dibagi kedalam 2 bentuk, yakni: s*mall disturbance* dan t*ransient stability.*

Small disturbance rotor angle stability mengacu pada kejadian gangguan-gangguan kecil seperti perubahan pada beban. Sedangkan *transient stability* mengacu pada kejadian dengan gangguan-gangguan besar seperti: gangguan hubung singkat (*short circuit*) pada saluran transmisi, penambahan beban secara tiba-tiba, lepasnya generator dari sistem maupun terjadinya kehilangan beban.

Sebuah mesin sinkron memiliki 2 rangkaian penting, yaitu: rangkaian medan (terdapat pada rotor) dan rangkaian jangkar (*armature*) yang terdapat pada stator. Kumparan medan disuplai oleh sumber DC. Putaran medan magnet dari kumparan medan menginduksikan tegangan AC ketika rotor digerakan oleh

sebuah *prime mover* (turbin). Frekuensi dari tegangan induksi ini bergantung pada kecepatan rotor dan jumlah kutub dari mesin. Frekuensi tegangan listrik dan kecepatan sinkron dari mekanik rotor adalah 50 Hz (di Indonesia dan beberapa negara lainnya).

Ketika 2 atau lebih mesin sinkron yang ter-interkoneksi, arus dan tegangan stator harus memiliki frekuensi yang sama dan kecepatan mekanik rotor dari masing-masing mesin adalah sinkron pada frekuensi ini[24].

2.3. *Frequency Stability*

Stabilitas frekuensi berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk menjaga frekuensi sistem setelah terjadi ketidakseimbangan antara daya aktif (P) pembangkitan dan beban akibat gangguan sistem[3]. Frekuensi merupakan indikator *balance* atau *unbalance* antara pembangkitan dan pemakaian (beban). Dalam operasi normal, frekuensi harus mendekati nilai nominalnya (50±5% Hz untuk STL di Indonesia).

Jika pemakaian energi listrik lebih besar dibandingkan dengan pembangkitannya, energi putar yang tersimpan dalam mesin sinkron akan digunakan untuk menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan pemakaian. Sehingga kecepatan putaran dari generator akan berkurang dan mengakibatkan penurunan frekuensi.

Salah satu hal yang mengakibatkan ketidakstabilan frekuensi adalah kehilangan pembangkitan atau beban. Dengan kehilangan pembangkitan atau beban ini maka akan terjadi ketidakseimbangan antara pembangkitan (*generation*) dan pembebanan (*load*).

2.4. *Voltage Stability*

Stabilitas tegangan merupakan kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan keadaan tegangan dalam keadaan tetap (tegangan nominal di Indonesia adalah 220±10% V) pada semua bus di bawah kondisi operasi normal dan setelah terjadinya gangguan. Stabilitas tegangan bergantung pada keseimbangan antara daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) antara pembangkitan dan beban. Ketidakstabilan tegangan terjadi ketika suatu gangguan meningkatkan permintaan daya reaktif (Q) yang melebihi kapasitas pembangkitan daya reaktif (Q) dari generator[6].

Fenomena stabilitas tegangan diklasifikasikan menjadi gangguan kecil dan gangguan besar.

Permasalahan dan studi kestabilan sistem tenaga dapat digolongkan menjadi 3 jenis berdasarkan sifat dan besar gangguannya, yaitu[7]:

1. Kestabilan Keadaan Tunak (*Steady State Stability*)
2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)
3. Kestabilan Peralihan (*Transient Stability*)

Steady state stability berhubungan dengan respon dari sebuah mesin sinkron untuk menaikkan beban secara bertahap/berangsur-angsur (*gradually*). Kestabilan ini berfokus pada penentuan batas atas dari pembebanan mesin sebelum mesin kehilangan keserempakan (*synchronism*), yaitu dengan menaikkan pembebanan secara bertahap.

Dynamic stability berkaitan dengan respon sistem tenaga terhadap gangguan-gangguan kecil yang terjadi dengan menghasilkan osilasi. Sistem dikatakan stabil secara dinamik jika osilasi-osilasi ini tidak melebihi amplitudonya dan hilang

secara cepat. Jika osilasi terus berlanjut pada amplitudo maka sistem tidak stabil secara dinamik.

Transient stability berhubungan dengan respon sistem tenaga terhadap gangguan-gangguan besar yang menyebabkan perubahan-perubahan cukup besar pada kecepatan rotor, sudut daya, dan transfer daya. *Transient stability* merupakan fenomena yang cepat yang biasanya dalam beberapa detik[8].

2.5. Teknik Analisa dalam Kestabilan Transien

Dalam permasalahan kestabilan transien (*transient stability*) terdapat beberapa teknik/pendekatan dalam studi analisa kestabilan transien. Teknik/pendekatan dalam analisis kestabilan transien tersebut adalah[20]

a) *Time Domain Simulation*

Time Domain Simulation merupakan metode tidak langsung (*indirect*), dinamakan demikian karena penyelesaian persamaan *non-linier* dari pemodelan sistem tenaga listrik diselesaikan menggunakan teknik *step-by-step* dari integrasi numerik. Beberapa metode integrasi numerik yang umum digunakan dalam penyelesaian persamaan *non-linier* adalah Euler, Runge-Kutta (orde 2, 4, 5), dll. Penyelesaian ini mempertimbangkan kondisi jaringan selama gangguan (*faulted*) dan kondisi setelah gangguan dihilangkan (*post-fault*).

b) *Direct Method*

Direct Methode atau metode langsung, dinamakan demikian karena pada analisa kestabilan transien tidak menyelesaikan persamaan *non-linier* dari pemodelan sistem tenaga listrik. Metode ini berdasarkan pada fungsi energi (*energy function*).

Beberapa metode *direct method* adalah EAC (*Equal Area Criterion*), Extended EAC, dll.

2.6. Studi Kestabilan Transien

Studi kestabilan transien (*transient stability*) adalah studi mengenai kestabilan pada sistem tenaga listrik yang berorientasi pada gangguan-gangguan besar yakni gangguan-gangguan yang akan menyebabkan sistem akan kehilangan sinkronisasi/keserempakan jika upaya penanganan/tindakan tidak segera diberikan. Penelitian atau studi terkait permasalahan kestabilan transien telah lama dilakukan dan beberapa diantaranya dalam "*Sistem Tenaga Listrik*" oleh Cekmas Cekdin (2007)[15]. Studi kestabilan transien multi mesin yang diambil adalah 2 buah generator yang terhubung dengan sebuah *infinite* bus. Dalam studinya, penyelesaian persamaan ayunan sistem menggunakan metode numerik Runge-Kutta Orde 4. Perhitungan daya elektrik (P_{ei}) sistem untuk masing-masing generator dan proses reduksi matriks Y-bus (*prefault, faulted* dan *postfault*) masih dihitung secara manual, sehingga tingkat *error* atau kesalahan dalam perhitungan masih mungkin terjadi.

Selanjutnya, Rifai Rahman Hasan (2009), mengenai "*Analisis Pengaruh Pemasangan Kompensator Kapasitor Seri Terhadap Stabilitas Sistem"*. Tujuan dari penelitiannya adalah mengetahui pengaruh pemasangan kompensator kapasitor seri terhadap kestabilan sistem tenaga listrik. Simulasi yang dilakukan menggunakan metode Runge-Kutta Orde 5 sebagai metode numerik penyelesaian persamaan ayunan[10].

Pada tahun 2012, Surya Atmaja melakukan penelitian *"Perhitungan Critical Clearing Time dengan Menggunakan Time Domain Simulation"*. Pada penelitiannya membahas cara menghitung *Critical Clearing Time* (CCT) menggunakan program MATLAB dengan menerapkan penyelesaian numerik menggunakan metode Runge-Kutta Orde 4[22].

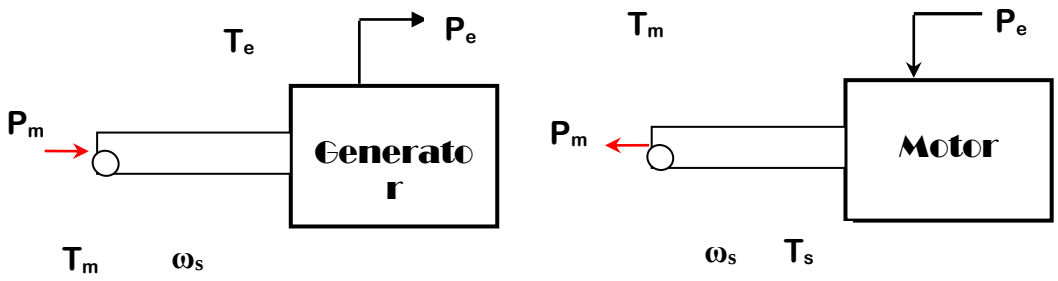
Selanjutnya, Heru Dibyo Laksono (2012), "*Sudi Stabilitas Peralihan Multimesin Pada Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Euler (Studi Kasus: PT.PLN P3B Sumatera)*". Dalam studinya, penyelesaian langkah demi langkah dari persamaan ayunan sistem tenaga listrik P3B Sumatera menggunakan metode Euler[23].

Metode Euler ini merupakan salah satu metode yang biasa digunakan dalam penyelesaian numerik untuk persamaan *non-linier*. Metode ini mengembangkan turunan pertama dari deret Taylor. Jika dibandingkan dengan metode Runge-Kutta orde 2 dan RK 4, metode Runge-Kutta memiliki ketelitian yang lebih besar dalam akurasi penyelesaian permasalahan numerik. Semakin tinggi orde pada metode Runge-Kutta maka semakin tinggi pula tingkat keakurasian dalam penyelesaian kurva ayunan, hal ini dikarenakan langkah demi langkah (integrasi) pada setiap orde juga bertambah.

Penelitian ini mengembangkan studi kestabilan[15] sehingga perhitungan daya elektrik (P_{ei}) untuk masing-masing generator dan proses reduksi matrik Y-bus tidak lagi dihitung secara manual melainkan dihitung secara komputerisasi dalam program *m-file* pada MATLAB yang dirancang. Selain itu, pemilihan metode Runge-Kutta Fehlberg pada penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan keakurasian dalam penyelesaian persamaan ayunan sistem IEEE 9 bus karena memiliki orde yang lebih tinggi dibandingkan dengan RK 5[10] ataupun RK 4.

2.7. Persamaan Ayunan (*Swing Equation*)

Hubungan antara sisi elektrik dan mekanik dari mesin sinkron diberikan dengan persamaan dinamis untuk *acceleration* atau *deceleration* dari gabungan *prime mover* (turbin)-mesin sinkron. Hal inilah yang dinamakan dengan persamaan ayunan[9]. Dengan kata lain, persamaan ayunan merupakan persamaan yang mengatur putaran/gerakan rotor pada mesin sinkron yang berdasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika, yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) adalah perkalian dari momen kelembaman ***J***(*moment of inertia*) rotor dengan percepatan sudutnya [10]. Kecepatan dan aliran dari daya mekanik dan elektrik pada sebuah mesin sinkron ditunjukan pada gambar 2.2 di bawah ini.



(a) Generator (b) Motor

Gambar 2.2 Aliran daya mekanik dan elektrik dalam sebuah mesin sinkron[7]

Pengaturan persamaan diferensial dinamis rotor dapat dituliskan sebagai berikut[7],[10],[11].

..... 2.3)

dengan

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

= Pergeseran sudut rotor (*angular displacement*) terhadap sumbu yang diam (rad)

= Momen putar percepatan bersih (Nm)

= Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran (Nm), bernilai negatif untuk motor.

= Momen putar elektris/elektromagnetis (Nm), bernilai negatif untuk motor.

Jika generator sinkron membangkitkan torsi elektromagnetik dalam keadaan berputar pada kecepatan sinkron (ω_{sm}) maka

Ketika terjadi gangguan maka akan menghasilkan percepatan (*accelerating*) () atau perlambatan (*decelerating*) ().

Berdasarkan pada persamaan 2.3 yaitu diukur terhadap sumbu yang diam maka untuk mendapatkan pengukuran posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar terhadap kecepatan sinkron dapat dituliskan dengan persamaan berikut.

.....2.4)

(adalah adalah pergeseran angular rotor atau biasa disebut dengan sudut putaran/sudut daya pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron dalam radian).

Untuk mendapatkan persamaan kecepatan putaran rotor () maka persamaan 2.4 dapat diturunkan terhadap waktu menjadi

.....2.5)

Sedangkan untuk mendapatkan persamaan percepatan rotornya maka persamaan 2.5 dapat diturunkan kembali terhadap waktu menjadi

.....2.6)

Dengan substitusi persamaan 2.6 ke dalam persamaan 2.3 akan didapatkan

.....2.7)

Selanjutnya dengan mengalikan persamaan 2.7 dengan akan menghasilkan

.....2.8)

Karena daya adalah sama dengan perkalian kecepatan putar dan torsi (momen putar) maka persamaan 2.8 dapat ditulis kembali dengan bentuk persamaan daya

.....2.9)

dengan

adalah masukan daya mekanik (MW)

adalah keluaran daya elektrik (MW)

Rugi-rugi tembaga stator diabaikan.

Dimana adalah momen sudut rotor yang dapat dinyatakan dengan M (disebut juga konstanta inersia[7]). Masa putar memiliki hubungan dengan energi kinetik yang dituliskan pada persamaan berikut.

.....2.10)

Persamaan ayunan dalam hubungannya dengan momen sudut adalah

.....2.11)

Apabila p adalah jumlah kutub dari generator sinkron, maka sudut daya listrik dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik adalah sebagai berikut.

Persamaan ayunan dalam hubungan dengan sudut daya elektrik adalah

.....2.12)

Jika nilai M pada persamaan 2.10 disubstitusikan ke dalam persamaan 2.12 akan diperoleh

.....2.13)

Selanjutnya membagi persamaan 2.13 dengan S_{base} (S_B) maka akan menghasilkan

.....2.14)

Akan diperoleh persamaan 2.15 ketika mensubstitusikan ke dalam persamaan 2.14.

.....2.15)

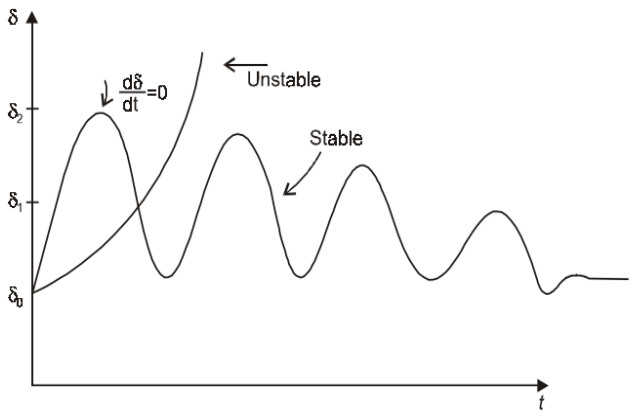
Kecepatan putar elektrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik adalah , sehingga persamaan 2.15 menjadi

.....2.16)

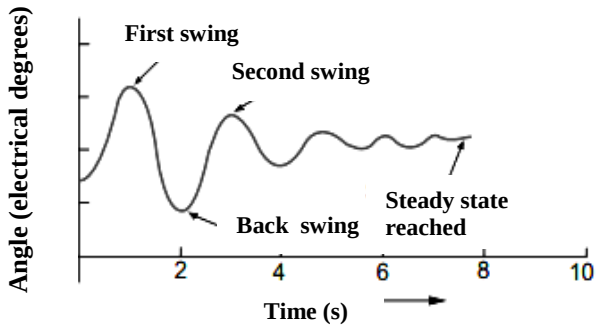
Dengan mensubstitusikan ke dalam persamaan 2.16 akan diperoleh

.....2.17)

Persamaan 2.16 atau 2.17 dinamakan dengan persamaan ayunan (*swing equation*)[7],[11],[12],[13] yang merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan. Persamaan ini menggambarkan dinamis rotor untuk sebuah mesin sinkron (*generating/ motoring*). Ini adalah persamaan diferensial orde kedua dimana *damping* (*proportional to*) tidak ada karena asumsi dari rugi-rugi mesin. Apabila persamaan ayunan tersebut diselesaikan maka akan diperoleh rumusan sebagai fungsi waktu (t). Grafik penyelesaian persamaan ini dinamakan dengan kurva ayunan (*swing curve*) mesin. Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 2.3 dan 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.3 Grafik terhadap *t* untuk sistem *stable* dan *unstable*[8]



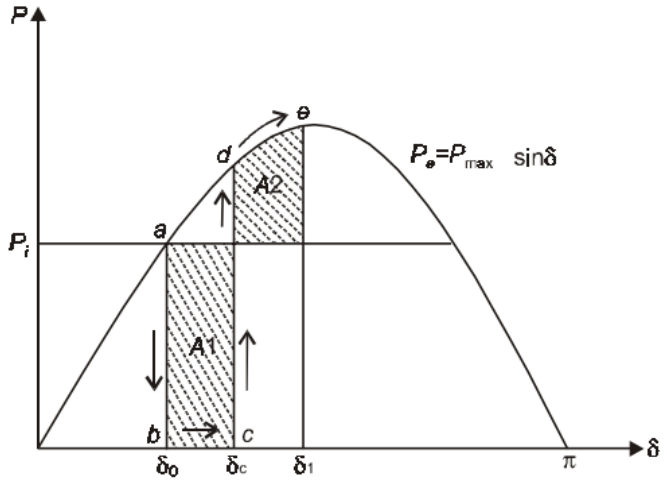
Gambar 2.4 Tipe kurva ayunan untuk generator[14]

2.8. CCT (*Critical Clearing Time*)

Critical Clearing Time atau waktu pemutusan kritis adalah waktu kritis yang dibutuhkan mesin sinkron untuk menjaga/mempertahankan kondisi mesin tetap dalam keserempakan (*synchronism*).

Pada sistem SMIB (*Single Machine Infinite Bus*) atau 2 mesin dengan *infinite bus*, penentuan kestabilan dapat dilakukan menggunakan metode langsung (*direct methode*) yaitu dengan EEA (*Equal Area Criterion*)/kriteria luas sama. Dengan metode EEA ini akan diperoleh sudut rotor kritis () yang akan menentukan luas

A1 (daerah *acceleration*) sama dengan A2 (daerah *deceleration*). Pada gambar 2.5 berikut menggambarkan karakteristik kurva .



Gambar 2.5 Karakteristik [8]

Penentuan kriteria A1 = A2 menggunakan persamaan berikut,

$$P_i\,(\delta_c - \delta_0) = \int_{\delta_c}^{\delta_1} (P_e - P_i)\,d\delta$$

Dengan diperolehnya maka CCT dapat ditentukan karena CCT adalah waktu yang dibutuhkan oleh sistem ketika sudut rotor kritis diperoleh.

$$t_c = \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi f P_i}}$$

Sedangkan pada analisis kestabilan mesin majemuk (*multimachine*), penentuan CCT diperoleh dari kurva ayunan (*swing curve*). Kurva ayunan merupakan hubungan antara sudut rotor dan waktu. Penentuan CCT mempertimbangkan kondisi sistem selama gangguan (*faulted*) dan setelah gangguan dihilangkan (*postfault*).

Pada penelitian ini, CCT diperoleh dengan melihat kestabilan kurva ayunan stabil/tidak stabil. Kestabilan ini ditentukan oleh nilai ω (kecepatan sudut rotor dalam rad/s) dari penyelesaian numerik Runge-Kutta Fehlberg. Ketika pada ayunan pertama (*first swing*) diperoleh maka sistem dikatakan stabil (*stable*). Namun sebaliknya, jika maka sistem dikatakan tidak stabil (*unstable*).

2.9. Stabilitas Peralihan *(Transient)* Mesin Majemuk (*Multimachine*)

Studi stabilitas peralihan *(transient)* melibatkan pada gangguan-gangguan besar, sehingga pemodelan persamaan matematis dari sistem tersebut adalah persamaan *non-linier*. Oleh karena itu, penyelesaian dari permasalahan studi ini menggunakan penyelesaian secara integrasi. Studi stabilitas peralihan *(transient)* biasanya hanya menganalisis pada ayunan pertama (*first swing*) yaitu pada detik pertama. Hal ini dikarenakan penerapan asumsi-asumsi yang digunakan pada studi stabilitas peralihan. Jika pada detik pertama sistem masih mempertahankan keserempakan (*synchronism*) setelah mengalami gangguan besar, maka sistem dikatakan stabil. Sedangkan analisis *multiswing* memerlukan waktu studi yang lebih lama karena sistem kontrol pada unit pembangkitan diperhitungkan. Sistem kontrol ini akan mempengaruhi tampilan dinamik dari pembangkit selama pengembangan waktu[11].

Studi stabilitas mesin majemuk (*multimachine*) klasik umumnya menerapkan gangguan 3 fasa simetris. Pemilihan gangguan 3 fasa simetris diambil menjadi salah satu variasi gangguan peralihan *(transient)* karena gangguan ini memberikan pengaruh yang besar terhadap sistem tenaga listrik. Arus gangguan yang diakibatkan oleh gangguan 3 fasa simetris ini adalah yang paling besar

dibandingkan dengan arus gangguan 1 atau 2 fasa. Oleh karena itu, analisis stabilitas peralihan *(transient)* mesin majemuk memperhitungkan gangguan yang lebih berdampak besar terhadap sistem tenaga listrik.

Analisis kestabilan pada sistem mesin majemuk akan lebih kompleks dan rumit dibandingkan dengan analisis kestabilan pada sistem SMIB (*Single Machine Infinite Bus*). Sehingga beberapa asumsi digunakan dalam analisis ini untuk mengurangi kerumitan tersebut. Berikut ini adalah beberapa asumsi yang digunakan [7],[10],[11],[15]:

a) Merepresentasikan setiap mesin sinkron sebagai sumber tegangan konstan disamping reaktansi peralihan *(transient)* sumbu langsung dengan mengabaikan efek saliensi/kutub tonjol dan mengasumsikannya sebagai fluks bocor yang konstan.
b) Mengansumsikan daya masukan ***Pm*** dan aksi governor selalu konstan selama simulasi.
c) Mengubah semua beban yang terhubung menjadi admitansi ke *ground* dan dianggap konstan.
d) Mengabaikan redaman (*damping*) atau daya asinkron.

Berikut ini adalah langkah-langkah yang digunakan dalam analisis kestabilan peralihan (*transient*):

1. Menyelesaikan aliran daya (*load flow*) dari sistem IEEE 9 bus, untuk mendapatkan *magnitude* dan sudut fasa tegangan ($\boldsymbol{V_i}$) pada masing-masing bus.
2. Menghitung arus mesin ($\boldsymbol{I_i}$) sebelum terjadi gangguan dengan persamaan:

.....2.18)

Dengan

m adalah jumlah generator

V_i adalah tegangan terminal generator ke-*i* pada hasil penyelesaian aliran daya

P_i adalah daya aktif generator pada hasil penyelesaian aliran daya

Q_i adalah daya reaktif generator pada hasil penyelesaian aliran daya

3. Menghitung sumber tegangan disamping reaktansi peralihan dengan persamaan:

.....2.19)

4. Dari perhitungan akan diperoleh sudut fasa tegangan pada generator, sudut fasa ini akan dijadikan inisial awal untuk sedangkan untuk inisial awal kecepatan rotor adalah .
5. Menghitung admitansi ekivalen semua beban berdasarkan persamaan berikut.

.....2.20)

Dengan

V_L adalah *magnitude* tegangan bus pada hasil penyelesaian aliran daya

P_L adalah daya aktif beban

Q_L adalah daya reaktif beban

6. Selanjutnya, menghitung matriks Ybus (matriks *n x n*) pada kondisi sebelum gangguan (*prefault*), selama gangguan (*faulted*) dan setelah gangguan dihilangkan (*postfault*).
7. Mereduksi matriks Ybus menggunakan *Kron's reduction*, yaitu:

.....2.21)

8. Menghitung persamaan daya elektrik untuk masing-masing generator berdasarkan matriks reduksi yang telah diperoleh menggunakan persamaan berikut.

.....2.22)

9. Kemudian menyelesaikan persamaan *non-linier* dari kurva ayunan (*swing curve*) menggunakan metode Runge-Kutta Fehlberg dan persamaan:

.....2.23)

2.10. Reduksi Matriks (Kron *Reduction*)

Dalam studi stabilitas multi mesin (***m***-buah generator dan ***n***-bus) membutuhkan penyederhanaan/pengurangan pada matriks Y-bus sistem tenaga, sehingga analisis kestabilan sistem dapat dilakukan. Sebuah sistem tenaga dengan ***m*** buah mesin/generator yang saling terinterkoneksi dan memiliki ***n*** buah bus akan memiliki matriks Y-bus yang berukuran ***n*** x ***n***. Penyederhanaan matriks ***n*** x ***n*** dilakukan dengan menggunakan Kron*'s reduction* dan akan menjadi matriks yang berukuran ***m*** x ***m*** (sesuai dengan jumlah generator). Berikut ini adalah proses reduksi matriks ***n*** x ***n*** menjadi ***m*** x ***m***[14].

.....2.24)

Dimana,

merupakan vektor arus injeksi pada bus

merupakan vektor tegangan yang diukur dari titik referensi

Elemen diagonal dari matriks admitansi bus adalah total admitansi yang terhubung pada bus tersebut. Elemen diagonal ini bertanda negatif sedangkan elemen matriks admitansi lainnya adalah positif. Dalam menghilangkan bus

beban, matriks admitansi harus dipartisi. Tidak ada arus yang masuk atau meninggalkan bus beban. Arus dalam baris ke *n* adalah nol. Arus generator dinyatakan dengan vektor dan tegangan generator dan beban dinyatakan dalam dan . Sehingga akan diperoleh,

Atau dapat dituliskan dalam persamaan matematis

.....2.25)

.....2.26)

Dari persamaan 2.25 dapat diperoleh

.....2.27)

Selanjutnya substitusikan persamaan 2.27 ke dalam persamaan 2.26, maka akan diperoleh :

.....2.28)

Matriks Y-bus reduksi

.....2.29)

.....2.30)

adalah matriks admitansi reduksi dengan dimensi ***m*** x ***m*** (m adalah jumlah generator)[15],[16],[17],[18].

2.11. Sistem Per Unit[25]

Analisis jaringan sistem tenaga listrik dilakukan dengan menggunakan besaran tegangan, ampere, ohm, dan voltampere. Untuk membuat analisis ini menjadi

lebih mudah maka perhitungan analisis jaringan menggunakan satuan perhitungan sistem per unit (pu), yang dinyatakan sebagai pecahan desimal dari suatu nilai dasar yang dipilih/ rasio nilai asli dengan nilai dasarnya. Umumnya, dasar kVA atau MVA dan dasar tegangan dalam kV adalah nilai yang dipilih untuk spesifikasi nilai dasar.

.....2.31)

.....2.32)

.....2.33)

Sistem per unit ini diperlukan dalam perhitungan analisis kestabilan transient. Selain untuk mempermudahkan perhitungan, sistem per unit ini diperlukan untuk penyelesaian persamaan ayunan (*swing equation*) dalam persamaan 2.17.

2.12. Runge-Kutta Fehlberg[19]

Metode Runge Kutta Fehlberg untuk pertama kalinya diperkenalkan oleh E. Fehlberg pada tahun 1970.

Rumusan umum dari metode Runge Kutta Fehlberg ini adalah sebagai berikut :

.....2.34)

Dimana :

.....2.35)

.....2.36)

.....2.37)

.....2.38)

.....2.39)

.....2.40)

2.13. Pengurangan Reaktansi Saluran Transmisi

Kestabilan suatu sistem tenaga sangat dipengaruhi oleh jenis dan lokasi terjadinya gangguan. Dalam permasalahan sistem SMIB (*Single Machine Infinite Bus*) peningkatan stabilitas dapat dilakukan dengan menaikkan konstanta inersia (H), namun metode ini tidak dapat diberlakukan dalam praktiknya karena alasan ekonomis dan alasan lambatnya respon dari kecepatan *governor* [7].

Dalam upaya meningkatkan stabilitas peralihan (*improving transient stability*), beberapa metode yang disarankan adalah [7],

a) Menaikkan tegangan sistem (menggunakan AVR).

b) Menggunakan sistem eksitasi dengan kecepatan tinggi.

c) Mengurangi reaktansi transfer sistem.

d) Menggunakan *breaker* berkecepatan tinggi.

Pengurangan reaktansi transfer adalah metode praktis yang penting dalam meningkatkan batas stabilitas. Pengurangan reaktansi saluran dapat dilakukan dengan mengurangi jarak konduktor dan menaikkan diameter konduktor. Namun metode yang efektif dan ekonomis adalah dengan kompensasi reaktansi saluran transmisi yaitu dengan pemasangan kapasitor seri. Selain itu, penambahan jumlah saluran transmisi juga mampu mengurangi reaktansi transfer.

2.13.1. Kompensasi Seri

Pemasangan kapasitor seri dalam saluran transmisi memberikan kontrol yang efektif terhadap reaktansi saluran, dengan demikian menaikkan limit daya statis atau menaikkan stabilitas sistem.

..... 2.41)

Dimana:

adalah reaktansi saluran total yang baru (ohm)

adalah reaktansi saluran (ohm)

adalah reaktansi kapasitor (ohm)

Pemasangan kapasitor seri akan mengurangi *voltage drop* yang besarnya adalah $\mathbf{I^2X}$. Reaktansi (X) akan bernilai positif jika induktif dan akan bernilai negatif jika kapasitif. Karena reaktansi induktif dan kapasitif akan saling mengurangi maka *voltage drop* pada saluran transmisi juga akan berkurang.

Salah satu yang perlu diperhatikan dengan kompensasi seri adalah derajat kompensasi. Perbandingan antara besarnya reaktansi kapasitif (X_C) dengan reaktansi total (X) menyatakan persentase dari kompensasi (*degree of compensation*) yang dapat dituliskan dalam bentuk berikut ini.

Untuk besarnya persentase kompensasi dianjurkan sebesar 25% – 75%.

2.13.2. Penambahan Jumlah Saluran Transmisi

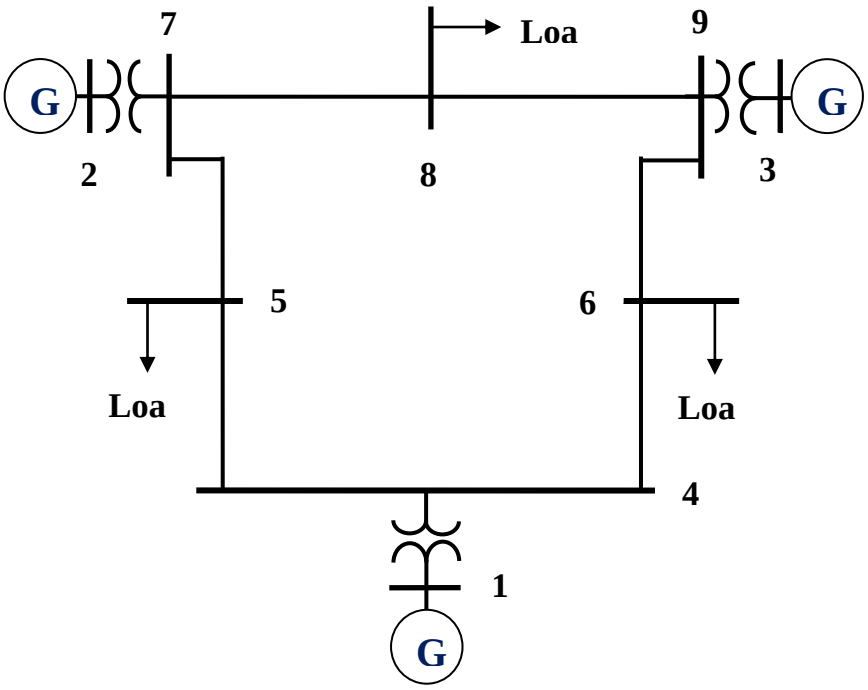
Penambahan jumlah saluran transmisi merupakan metode efektif lainnya yang dapat digunakan untuk mengurangi besarnya reaktansi saluran. Sebagaimana telah diketahui bahwa nilai reaktansi total dari suatu rangkaian paralel (X_{total}) dengan jumlah *n* saluran paralel adalah

.....2.42)

Sehingga dengan bertambahnya jumlah saluran paralel pada transmisi maka nilai reaktansi (X) sistem akan berkurang.

2.14. Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus

Studi kasus yang diambil sebagai studi dan analisis permasalahan kestabilan peralihan (*transient stability*) untuk sistem mesin majemuk (*multimachine*) adalah sistem IEEE 9 bus dengan 3 buah mesin/generator. Gambar 2.6 di bawah ini adalah *single line diagram* untuk sistem IEEE 9 bus. Data sistem IEEE 9 bus seperti: *transmission data, machine data, load data* dan *generation data* dapat dilihat pada lampiran 1.



Gambar 2.6 Sistem Tenaga Listrik IEEE 9 Bus[21]

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium terpadu jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni 2015 dan diselesaikan pada bulan Desember 2015.

3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Data Sekunder Sistem IEEE 9 Bus

   Data sekunder sistem IEEE 9 bus dengan tiga buah mesin (generator) yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

   a) Data Generator

      Data generator yang digunakan dalam penelitian ini adalah data pembangkitan masing-masing generator (P dan Q), konstanta inersia generator (H), dan reaktansi transien .

   b) Data Transformator

Data transformator yang digunakan dalam penelitian ini adalah data reaktansi transformator (X_T).

c) Data Saluran Transmisi

Data saluran transmisi yang digunakan dalam penelitian ini adalah data resistansi saluran (*R*) dan reaktansi saluran (*X*) serta data suseptansi (Y *Shunt*).

d) Data Beban Terhubung

Data beban terhubung yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa data daya aktif (P) dan daya reaktif (Q).

e) Data *Load Flow* (aliran daya) Sistem

Data aliran daya yang digunakan dalam penelitian ini berupa data tegangan pada masing-masing bus.

2. *Hardware* (*Personal Computer*/Laptop)

Jenis *hardware* yang digunakan sebagai perangkat keras pendukung penelitian ini adalah laptop ACER *type* ASPIRE 4752 Intel Core^{TM} i3-2350M.

3. *Software*

Jenis *software* (perangkat lunak) yang digunakan sebagai pendukung penelitian ini adalah *software* MATLAB R2011a.

3.3. Tahap Pembuatan Tugas Akhir

Dalam penyusunan dan pengerjaan tugas akhir ini akan melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. Studi Literatur

   Pada tahap studi literatur ini dimaksudkan untuk mempelajari berbagai sumber referensi (buku, jurnal dan internet) untuk mendapatkan pemahaman dan data pendukung yang berkaitan dengan analisis stabilitas transien mesin majemuk (*multimachine*).

2. Perancangan dan Pembuatan Perangkat Simulasi

   Dalam tahapan ini dimaksudkan untuk merancang dan membuat program simulasi dan penyelesaian dari kurva ayunan (*swing curve*) pada *software* MATLAB R2011a. Program ini meliputi pembentukan matriks admitansi dan matriks reduksi (*prefault, faulted* dan *postfault*) yang akan digunakan untuk menentukan persamaan daya elektrik mesin. Selanjutnya, persamaan daya ini akan digunakan untuk pembuatan program simulasi penyelesaian kurva ayunan mesin.

3. Pengambilan Data

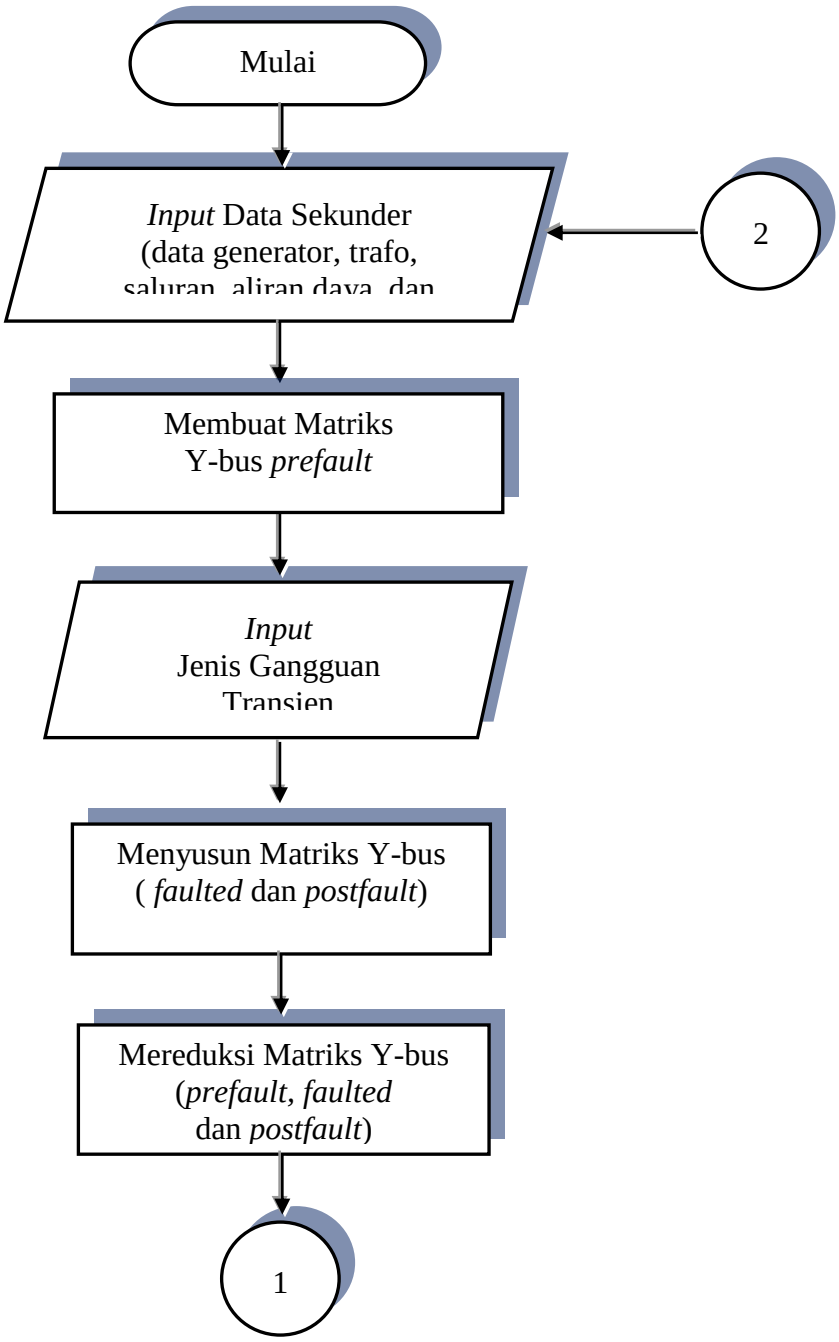
   Pada tahap ini dimaksudkan untuk mengambil data dari program simulasi yang dibuat. Data yang diambil berupa data kurva ayunan dengan variasi CCT (*critical clearing time*), gangguan saluran transmisi 3 fasa simetris, serta penambahan dan hilangnya beban secara tiba-tiba.

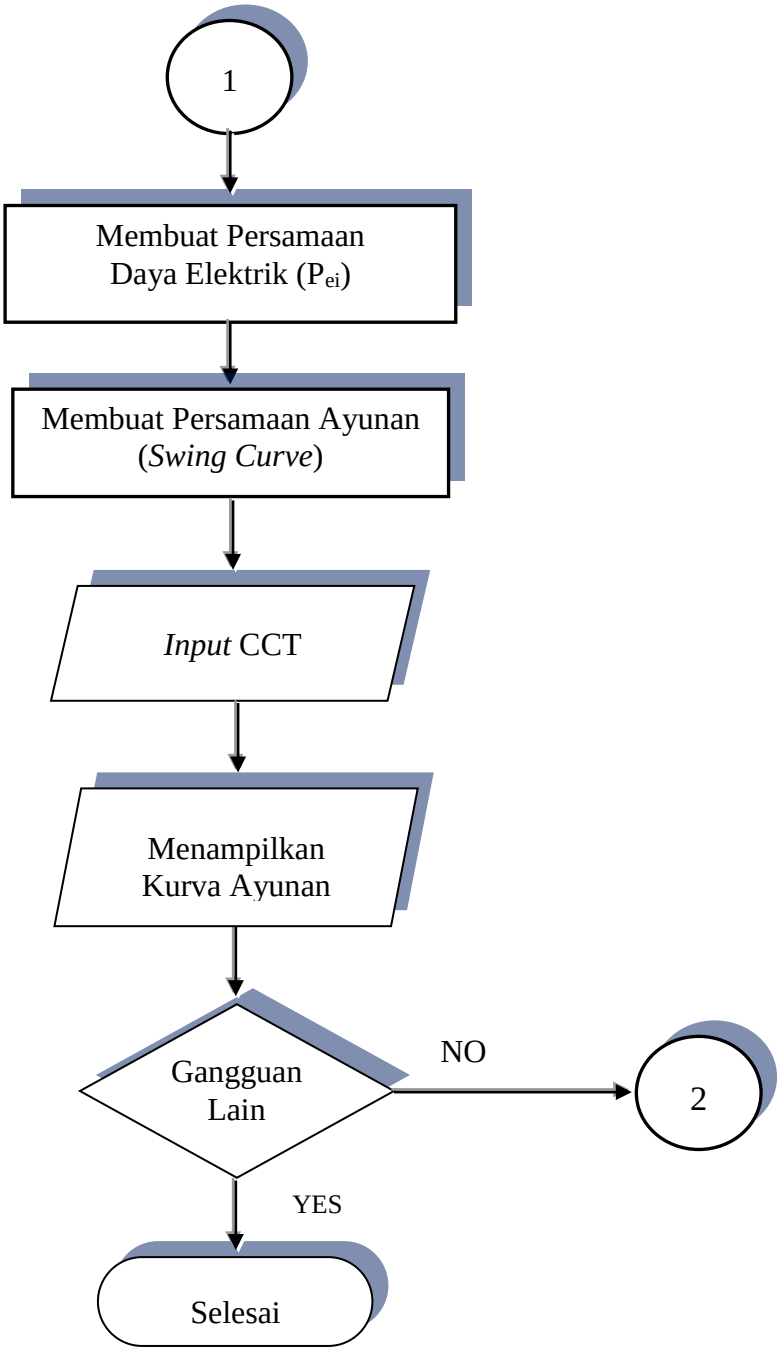
4. Analisis dan Pembahasan

   Pada tahap ini akan dilakukan analisis dan pembahasan mengenai perolehan data hasil pengujian yang dilakukan.

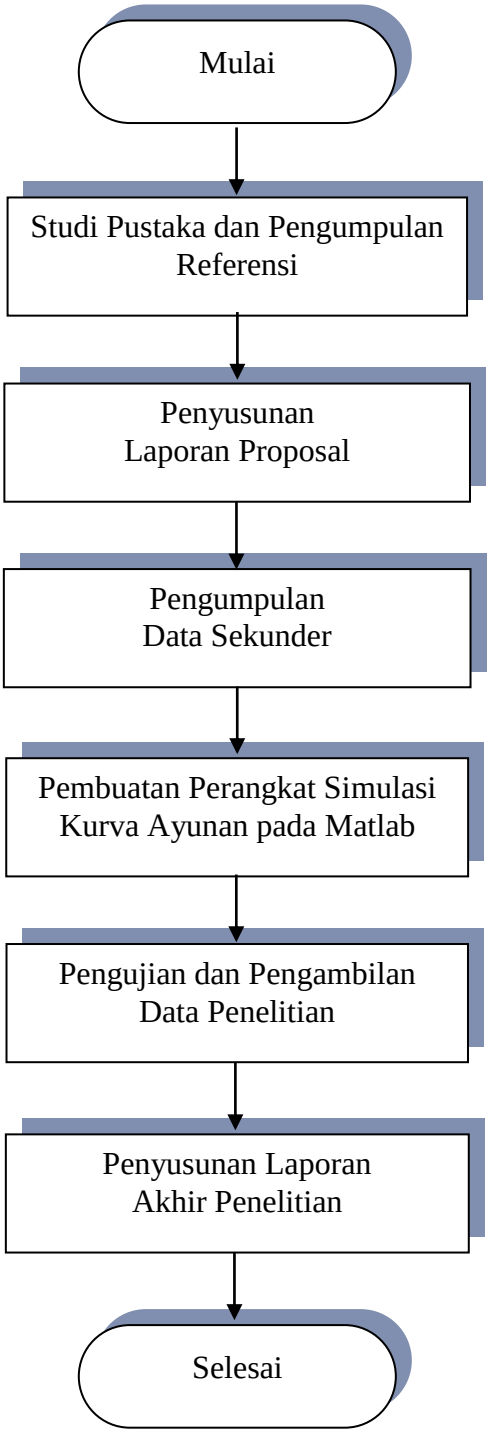
3.4. Diagram Alir Penelitian

Dalam penyusunan penelitian ini menggunakan diagram alir seperti pada gambar 3.1. di bawah ini.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penyelesaian Kurva Ayunan



Gambar 3.2 Diagram Alir Penyusunan Laporan Penelitian

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1. Simpulan

Berdasarkan penelitian mengenai pengaruh perubahan reaktansi saluran terhadap kestabilan transien dengan menggunakan metode Runge-Kutta Fehlberg yang telah dilakukan, maka dapat diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Ketika gangguan 3 fasa simetris pada saluran 8-9 diterapkan, generator 3 kehilangan keserempakkan/*out of step* (*unstable*) saat pemutusan gangguan saat 0.20 detik sedangkan ketika pemutusan gangguan dilakukan saat 0.19 detik kedua generator masih berayun. Hal ini menunjukkan sistem IEEE 9 bus masih dalam keserempakkan/stabil.
2. Waktu pemutusan kritis (CCT) sistem IEEE 9 bus dengan gangguan 3 fasa simetris pada saluran 8-9 dekat bus 9 adalah 0.19-0.20 detik. Ketika pemutusan gangguan dilakukan pada 0.20 detik, sistem menjadi tidak stabil. Dengan meningkatnya waktu pemutusan gangguan, amplitude sudut rotor dari kurva ayunan (*swing curve*) juga akan meningkat. Jika waktu pemutusan gangguan telah melewati waktu pemutusan kritisnya maka sistem menjadi *out of step*/hilang sinkronisasi.
3. Pemberian kompensasi pada saluran dapat memperbaiki kestabilan transien sistem IEEE 9 bus secara signifikan. Kompensasi saluran ini menurunkan

reaktansi saluran yang selanjutnya meningkatkan batas waktu pemutusan kritis gangguan. Dengan bertambahnya persentase kompensasi maka limit waktu pemutusan gangguan juga bertambah. Sedangkan penambahan jumlah saluran pada sistem tenaga listrik (STL) IEEE 9 bus mampu memperkecil ayunan sudut rotor dengan menurunkan nilai reaktansi sistem tersebut.

Selain itu, besarnya nilai konstanta inersia (H) pada generator sangat berpengaruh terhadap kestabilan sistem. Generator yang memiliki nilai H besar akan cenderung stabil ketika terjadi gangguan pada sistem. Namun sebaliknya jika nilai H kecil maka generator tersebut akan cenderung kehilangan sinkronisasi.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan terkait penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Studi stabilitas transien dapat menerapkan sistem kelistrikan yang *real*, yaitu sistem kelistrikan Lampung (Sumbagsel).

DAFTAR PUSTAKA

[1] Zuhal. 1995. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama.

[2] Wijaya, Mochtar. 2001. *Dasar-Dasar Mesin Listrik*. Jakarta: Djambatan.

[3] Gomez, Antonio Exposito dkk. 2009. *Electric Energy Systems Analysis and Operation*. New York: Taylor & Francis Group.

[4] P.Kundur. 1994. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.

[5] Paul M, Anderson. 1997. *Power System Control and Stability*. USA: Iowa State University Press.

[6] Despa, Dikpride. 2012. *Stability Assessment and Stabilization of Wide Area Interconnected Power System*. Kyushu Institute of Technology: Departement of Electrical and Electronic Engineering.

[7] Kothari, D.P & I J Nagrath. 2003. *Modern Power System Analysis Third Edition*. New York: Tata McGraw-Hill.

[8] Das,Debapriya. 2006. *Electrical Power Systems*. New Delhi: New Age International (P) Ltd.

[9] Murthy, P.S.R. 2007. *Power System Analysis*. India: BS Publications

[10] Rahman, Rifai Hasan. 2008. *Analisis Pengaruh Pemasangan Kompensator Seri Terhadap Stabilitas Sistem SMIB dan Sistem IEEE 14 Bus*.Universitas Diponegoro.

[11] Grainger, Jhon J & Stevenson, William. 1994. *Power System Analysis*. Singapore: McGraw-Hill, Inc.

[12] D.Stevenson, William. 1983. *Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga.

[13] Saadat, Hadi. 1999. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill.

[14] Weedy, B.M, Cory, B.J, Jenkins, N, Ekanayake, J.B, Strbac, G. *Electric Power Systems Fifth Edition.*UK: WILEY.

[15] Cekdin, Cekmas. 2007. *Sistem Tenaga Listrik-Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan Matlab*. Yogyakarta: ANDI.

[16] Anderson, Paul M & Fouad, A.A. 1977. *Power System Control and Stability*. The Iowa State University Press.

[17] Kamdar, Renuka dkk. 2014. *Transient Stability Analysis and Enhancement of IEEE-9 Bus System*. *Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ) Volume 3, Number 2, June 2014 India*.

[18] Osorno, Bruno. 2003.*Determination of Admittance and Impedance Bus Matrices Using Linier Algebra and Matlab in Electric Power System*. *California State University Northridge. Proceedings of the 2003 American Society for Engineering Education Annual Conference & Exposition Copyright 2003, American Society for Engineering Education*.

[19] Chapra, Steven C & Canale, Raymond P. 1988. *Numerical Methods for Engineers Second Edition*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.

[20] Chan, Kee Han. 2002. *Transient Analysis and Modelling of Multimachine Systems with Power Electronics Controllers for Real-time Application.* University of Glasgow.

[21] Wang, Xi-Fan. 2008. *Modern Power Systems Analysis*. New York: Springer.

[22] Surya Atmaja, Ardyono Priyadi dan Teguh Yuwono. *Perhitungan Critical Clearing Time dengan Menggunakan Metode Time Domain Simulation, Proseding Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro FTI-ITS, Juni 2012*.

[23] Dibyo, Heru Laksono. *Studi Stabilitas Peralihan Multimesin Pada Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Euler (Studi Kasus: PT.PLN P3B Sumatra) Vol. 19 No. 2 Oktober 2012*.

[24] Al Marhoon, Hussain Hassan. 2011. *A Practical Method For Power Systems Transient Stability and Security*. *University of New Orleans Theses and Disertations, paper 114*.

[25] K Pal, Mrinal. 2007. *Power System Stability*. New Jersey: Edison.

[26] Despa, Dikpride. *Application of Phasor Measurement Unit (PMU) Data for Out-of-Step Detection-16th International Conference on Electrical Engineering, July 11-14, 2010 Busan Korea*.