

**ANALISIS GANGGUAN 3 FASA PADA SALURAN
TRANSMISI TERHADAP *TRANSIENT STABILITY* SISTEM
MULTIMESIN MENGGUNAKAN METODE RUNGE-KUTTA
ORDE 5**

(Skripsi)

Oleh

VINA APRILIA



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2016**

ABSTRAK

ANALISIS GANGGUAN 3 FASA PADA SALURAN TRANSMISI TERHADAP *TRANSIENT STABILITY* SISTEM MULTIMESIN MENGUNAKAN METODE RUNGE-KUTTA ORDE 5

Oleh

VINA APRILIA

Kontinuitas penyaluran daya listrik suatu sistem tenaga listrik harus terjaga keandalannya. Sistem yang andal hendaknya mampu menjaga kondisi dalam keadaan stabil bila terjadi gangguan. Untuk melihat kondisi tersebut, dapat dilakukan simulasi studi *transient stability* multimesin. Studi *transient stability* multimesin ini bertujuan menganalisis sistem tenaga listrik jika terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa simetris terhadap setiap unit pembangkit di saluran transmisi bus beban. Gangguan di saluran transmisi ini mempengaruhi dari penentuan waktu pemutusan kritis yang cepat yaitu waktu kritis yang dibutuhkan generator sinkron untuk mempertahankan kondisi tetap dalam sinkronisasi.

Tugas akhir ini, menentukan waktu pemutusan kritis selama kondisi *transient* dengan metode Runge-Kutta orde 5 sebagai metode tidak langsung. Metode Runge-Kutta orde 5 digunakan untuk menghitung penyelesaian numerik persamaan differensial nonlinear dengan studi kasus IEEE 9 bus 3 mesin.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa semua titik saluran transmisi pada bus beban yang mengalami gangguan memiliki waktu pemutusan kritis kurang dari 1 detik kecuali pada salah satu bus dan dua saluran dengan nilai 1.98-1.99 detik. Hal ini terjadi karena faktor pembebanan dan pengaruh besarnya reaktansi saluran di sistem tenaga tersebut. Faktor pembebanan yang relatif kecil memiliki waktu pemutusan kritis yang besar dari bus lainnya serta besarnya reaktansi saluran mempengaruhi transfer daya yang diterima menjadi kecil.

Kata Kunci: *Transient Stability*, Sistem Multimesin, Metode Runge-Kutta Orde 5, IEEE 9 Bus 3 Mesin, Waktu Pemutusan Kritis Gangguan.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THREE PHASE FAULT ON TRANSMISSION LINE TO TRANSIENT STABILITY OF MULTIMACHINE SYSTEM USING RUNGE- KUTTA METHOD 5th ORDER

By

VINA APRILIA

Continuity of electrical power distribution in electric power system its reliability must be maintained. A reliable system should be able to maintain its stability in state of outages and fault condition. To obtain this conditions, transient stability multimachine study can be done. Transient stability multimachine study is aimed to analyse electrical power system when three phase short circuit symmetrical to each generating unit the transmission line load bus. Fault in this transmission line is located based on the method to determine a fast critical clearing time, which is a critical time required by synchronous generator to mantain its condition remain in synchronism.

This research, time of critical clearing time during transient condition will be determined by using Runge-Kutta Method 5th Order as undirect method. Runge-Kutta Method 5th Order is used to calculate numerical calculations of nonlinear differensial equations with IEEE 9 buses 3 machines.

The results of this simulation show that all points in transmission line spesipically in load bus where the fault occur have critical clearing time less than 1 second but it does not apply for one of the buses and two lines with 1.98 – 1.99 second. It can be happened because of load factor and influence of reactance in power system lines. A relatively small factor have a great critical clearing time from other bus and the amount of lines reactance will affect received power transfer become smaller.

Key Words: Transient Stability, Multimachine System, Runge Kutta Method 5th Order, IEEE 9 Buses 3 Machines, Critical Clearing Time (CCT) Fault.

**ANALISIS GANGGUAN 3 FASA PADA SALURAN
TRANSMISI TERHADAP *TRANSIENT STABILITY* SISTEM
MULTIMESIN MENGGUNAKAN METODE RUNGE-KUTTA
ORDE 5**

Oleh

VINA APRILIA

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 GANGGUAN 3 FASA PADA
SALURAN TRANSMISI TERHADAP
TRANSIENT STABILITY SISTEM
MULTIMESIN MENGGUNAKAN
METODE RUNGE-KUTTA ORDE 5**

Nama Mahasiswa : Dina Aprilia

Nomor Pokok Mahasiswa : 1115031082

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Eng. Dikpride Despa, S.T., M.T.
NIP 19720428 199803 2 001

Herri Gusmedi, S.T., M.T.
NIP 19710813 199903 1 003

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro

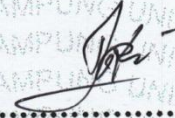
Dr. Ing. Ardian Ulvan, S.T., M.Sc.
NIP 19731128 199903 1 005

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

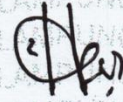
Ketua

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



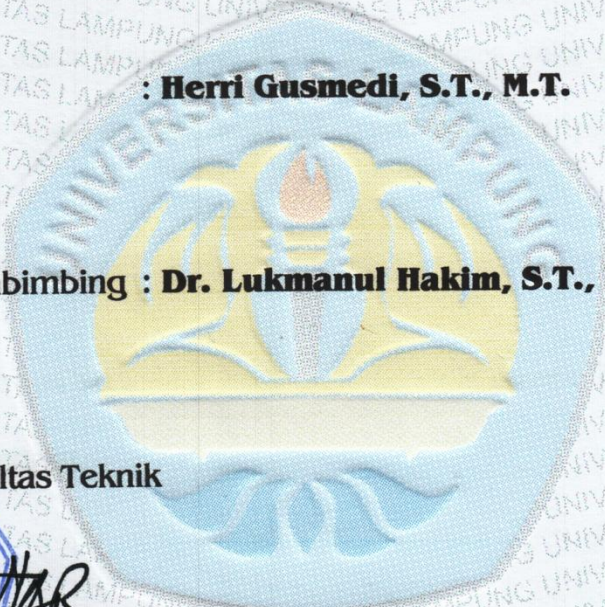
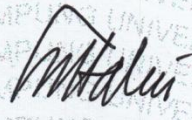
Sekretaris

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



Penguji

Bukan Pembimbing : Dr. 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 pengetahuan 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, 19 April 2016



Vina Aprilia

1115031082

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung pada tanggal 30 April 1993 sebagai anak pertama dari tiga bersaudara dari Bapak Sukarman dan Ibu Ponirah.

Jenjang pendidikan yang ditempuh oleh penulis dimulai dari Taman Kanak-Kanak Al-Fajar Bandar Lampung pada tahun 1999, Sekolah Dasar Negeri 1 Way Dadi Bandar Lampung pada tahun 2005, Sekolah Menengah Pertama Negeri 31 Bandar Lampung pada tahun 2008, dan Sekolah Menengah Atas Gajah Mada Bandar Lampung pada tahun 2011.

Tahun 2011, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) dan mendapatkan Beasiswa BidikMisi selama delapan semester. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di Organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) pada periode 2012-2013 sebagai Anggota Divisi Pendidikan Himatro Unila dan pada periode 2013-2014 menjabat sebagai Kepala Divisi Sosial Himatro Unila serta menjabat sebagai Anggota Departemen Eksakta Unit Kegiatan Mahasiswa Penelitian (UKM-P) Unila pada periode 2013-2014. Selain itu penulis juga menjadi Asisten Laboratorium Pengukuran Besaran Elektrik (PBE) praktikum Instrumentasi dan Pengukuran, Rangkaian Listrik dan Fisika Dasar periode 2014-2015. Pada tahun 2013, penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT. Energy Management Indonesia (EMI) dengan lokasi kerja Fakultas Teknik Gedung B Unila dengan mengambil judul “Prosedur Penggunaan Alat Ukur Audit Energi yang Dilakukan PT. Energy Management Indonesia (EMI) Di Area Kerja Gedung B Fakultas Teknik Unila”.

“Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat.” (Q.S. Al-Mujadalah : 11)

“Barang siapa yang menghendaki kehidupan dunia maka wajib baginya memiliki ilmu, dan barang siapa yang menghendaki kehidupan akhirat, maka wajib baginya memiliki ilmu, dan barang siapa menghendaki keduanya maka wajib baginya memiliki ilmu.” (HR. Tirmidzi)

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan.” (Q.S. Al-Insyirah: 5-6)



Yang utama dari segalanya,

Rasa syukur kepada Allah.SWT. taburan

cinta dan kasih sayang-Mu telah memberikan kekuatan, membekali dengan ilmu serta memperkenalkan dengan cinta.

Ibunda dan Ayahanda Tercinta,

(SUKARMAN & PONIRAH)

Sebagai tanda bakti, hormat, dan rasa terima kasih yang tiada terhingga kupersembahkan karya kecil ini kepada Ibu dan Ayah yang telah memberikan kasih sayang, segala dukungan dan cinta kasih yang tiada terhingga yang tidak mungkin dapat kubalas hanya dengan selembarnya kertas yang bertuliskan cinta dan persembahan.

Adikku Tercinta,

(VIRANTI & VITA DEWI)

Tiada yang paling mengharukan saat kumpul bersama kalian, walaupun sering bertengkar tapi hal itu selalu menjadi warna yang tidak bisa tergantikan, terimakasih atas doa kalian selama ini, Dek.



DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR SINGKATAN	xx
DAFTAR ISTILAH	xxi
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang dan Masalah	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Rumusan Masalah	4
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Sistem Tenaga Listrik	6
2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	6
2.3 Kestabilan Sistem Multimesin : Representasi Klasik	8

2.4	Sistem Per-Unit	9
2.5	Stabilitas Peralihan (<i>Transient Stability</i>) Multimesin	10
2.6	Rotor Angle Stability	13
2.7	Persamaan Ayunan (<i>Swing Equation</i>)	13
2.8	Gangguan Tiga Fasa Seimbang	18
2.9	Pendekatan Analisis Stabilitas Peralihan (<i>Transient Stability</i>)	
2.1.1.	Pendekatan <i>Time Domain Simulation</i> (TDS)	19
2.1.2.	Pendekatan <i>Direct Method</i>	19
2.10	Waktu Pemutusan Kritis (<i>Critical Clearing Time</i>)	20
2.11	Metode Runge-Kutta Orde 5	20
2.12	Sistem Kelistrikan Model IEEE 9 Bus 3 Mesin	22
2.13	Studi Stabilitas Peralihan (<i>Transient Stability</i>)	24

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	30
3.2	Alat dan Bahan	30
3.2.1.	Data Sekunder Sistem IEEE 9 Bus 3 Mesin	30
3.2.2.	<i>Hardware</i> (<i>Personal Computer/Laptop</i>)	31
3.2.3.	<i>Software</i>	31
3.3	Tahap Pembuatan Tugas Akhir	31
3.3.1.	Studi Literatur	31
3.3.2.	Perancangan dan Pembuatan Perangkat Simulasi	32
3.3.3.	Pengambilan Data	32
3.3.4.	Analisis dan Pembahasan	32

3.4	Diagram Alir Penelitian	32
-----	-------------------------------	----

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Pemodelan Sistem	36
4.2	Sistem Kelistrikan Diagram Segaris 2 Generator 1 Infinite Bus dan 9 Bus 3 Generator	37
4.3	Hasil Pengujian Simulasi Program terhadap Referensi Buku	38
4.3.1.	Pengujian Simulasi Program dengan Metode Runge- Kutta Orde 4	39
4.3.2.	Pengujian Simulasi Program dengan Metode Runge- Kutta Orde 5	40
4.3.3.	Hasil Pengujian Simulasi Program terhadap Referensi	42
4.4	Hasil Simulasi Kurva Ayunan Data IEEE 9 Bus 3 Generator dengan Metode Runge-Kutta Orde 5	43
4.5	Hasil Waktu Pemutusan Gangguan untuk Sumua Titik Gangguan Saluran	52
4.6	Analisa Hasil Simulasi Kurva Ayunan.....	53

5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1.	Kesimpulan	55
5.2.	Saran	56

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1. Grafik δ terhadap t untuk sistem <i>stable</i> dan <i>unstable</i>	18
2.2. Sistem kelistrikan model IEEE 9 Bus 3 Mesin	22
2.3. Diagram segaris sistem tenaga listrik	26
3.1. Diagram alir penyelesaian kurva ayunan	33
4.1. Diagram segaris sistem 2 Generator 1 Infinite Bus	36
4.2. Diagram segaris sistem 9 Bus 3 Generator	37
4.3. Metode runge-kutta orde 4 dengan waktu pemutusan gangguan 0.20 detik (kondisi stabil)	38
4.4. Metode runge-kutta orde 4 dengan waktu pemutusan gangguan 0.21 detik (kondisi tidak stabil)	38
4.5. Metode runge-kutta orde 5 dengan waktu pemutusan gangguan 0.20 detik (kondisi stabil)	39
4.6. Metode runge-kutta orde 5 dengan waktu pemutusan gangguan 0.21 detik (kondisi tidak stabil)	40
4.7. Hasil pengujian metode runge-kutta orde 5 terhadap runge- kutta orde 4	41
4.8. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 4-5 dekat bus 4, waktu pemutusan gangguan 0.39 detik	42

4.9. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 4-5	
dekat bus 4, waktu pemutusan gangguan 0.40 detik	43
4.10. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 5-7	
dekat bus 5, waktu pemutusan gangguan 0.39 detik	44
4.11. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 5-7	
dekat bus 5, waktu pemutusan gangguan 0.40 detik	44
4.12. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 6-9	
dekat bus 6, waktu pemutusan gangguan 1.00 detik	45
4.13. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 6-9	
dekat bus 6, waktu pemutusan gangguan 1.97 detik	46
4.14. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 6-9	
dekat bus 6, waktu pemutusan gangguan 1.98 detik	46
4.15. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 7-8	
dekat bus 7, waktu pemutusan gangguan 0.14 detik	47
4.16. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 7-8	
dekat bus 7, waktu pemutusan gangguan 0.15 detik	47
4.17. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 8-7	
dekat bus 8, waktu pemutusan gangguan 0.16 detik	48
4.18. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 8-7	
dekat bus 8, waktu pemutusan gangguan 0.17 detik	48
4.19. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 9-6	
dekat bus 9, waktu pemutusan gangguan 0.15 detik	49
4.20. Grafik hasil simulasi delta terhadap waktu di saluran 9-6	
dekat bus 9, waktu pemutusan gangguan 0.16 detik	50

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
2.1. Data Tegangan dan Tipe Bus Model IEEE 9 Bus 3 Mesin	22
2.2. Data Pembangkitan dan Beban Tiap Bus Model IEEE 9 Bus 3 Mesin	23
2.3. Data Saluran dan Line Charging Model IEEE 9 Bus 3 Mesin	23
2.4. Data Pembangkit Sistem Tenaga Listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin	24
4.1. Penjelasan Kasus Stabilitas Peralihan	35
4.2. Perbedaan Sudut Rotor Maksimum	44
4.3. Hasil Simulasi Sistem 9 Bus 3 Generator	52

DAFTAR SINGKATAN

- CCT : *Critical Clearing Time*, waktu kritis yang dibutuhkan generator sinkron untuk mempertahankan kondisi generator tetap dalam sinkronisasi.
- IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, organisasi nirlaba internasional yang merupakan asosiasi profesional utama untuk peningkatan teknologi elektro.
- MATLAB : *Matrix Laboratory*, sebuah program untuk menganalisis dan mengkomputasi data numerik.
- TDS : *Time Domain Simulation*, metode tidak langsung yang memecahkan permasalahan stabilitas peralihan menggunakan penyelesaian numerik persamaan differensial nonlinear melalui step by step untuk menghitung setiap mesin dari kurva ayunan.
- SMIB : *Single Machine Infinite Bus*, suatu sistem yang terdiri dari satu mesin dengan bus tak terhingga.
- SC : *Short Circuit*, arus hubung singkat, arus lebih yang dihasilkan oleh gangguan dengan mengabaikan impedansi antara titik-titik pada potensial yang berbeda dalam kondisi layanan normal.

DAFTAR ISTILAH

- Reliability* : kemampuan sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus-menerus.
- Quality* : kemampuan sistem untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi.
- Stability* : kemampuan sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami gangguan.
- Steady State Stability* : kemampuan sistem tenaga untuk kembali sinkron setelah menerima gangguan kecil.
- Dynamic Stability* : kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah terjadi gangguan kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama.
- Transient Stability* : kemampuan sistem untuk mencapai kesinkronan setelah mengalami gangguan besar sehingga sistem kehilangan stabilitas akibat gangguan yang terjadi di atas kemampuan sistem.
- Circuit Breaker* : alat pemutus arus listrik otomatis, dikarenakan lebihnya arus yang melewati *circuit breaker* tersebut.
- Critical Clearing Time* : waktu pemutusan kritis gangguan.
- Rotor Angle Stability* : stabilitas dari segi sudut rotor.
- Frequency Stability* : stabilitas dari segi frekuensi.

<i>Voltage Stability</i>	: stabilitas dari segi tegangan.
<i>Infinite Bus</i>	: bus tak terhingga.
<i>Classical Stability Model</i>	: model kestabilan klasik.
<i>First Swing</i>	: kestabilan ayunan pertama.
<i>Multiswing</i>	: kestabilan ayunan majemuk.
<i>Prefault</i>	: kondisi sebelum gangguan.
<i>Faulted</i>	: kondisi selama gangguan.
<i>Postfault</i>	: kondisi setelah gangguan.
<i>Swing Equation</i>	: persamaan ayunan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin sinkron yang didasarkan pada prinsip dinamika.
<i>Accellarating Torque</i>	: momen putar percepatan.
<i>Moment of Inertia</i>	: momen kelembaman.
<i>Swing Curve</i>	: kurva ayunan.
<i>Stable</i>	: kondisi sistem stabil.
<i>Unstable</i>	: kondisi sistem tidak stabil.
<i>Load Flow</i>	: aliran daya.
<i>Time Domain Simulation</i>	: metode tidak langsung untuk menentukan waktu pemutusan melalui <i>step by step</i> antara kondisi stabil dan tidak stabil.
<i>Direct Method</i>	: metode langsung untuk menentukan waktu pemutusan kritis yang dapat langsung ditentukan.
<i>Energy Function</i>	: metode perhitungan langsung yang berhubungan dengan energi kinetik dan energi potensial.

Single Machine Infinite Bus : sistem yang terdiri dari satu mesin dengan bus tak terhingga.

Multi Machine : sistem yang terdiri dari beberapa unit pembangkit (multimesin).

Out of Step : mesin yang lepas dari sistem.

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang dan Masalah

Sistem kelistrikan pada umumnya memiliki beberapa pusat pembangkit yang saling terinterkoneksi meliputi pusat Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) dan pembangkit listrik lainnya. Di dalam keadaan sistem tenaga listrik yang saling terinterkoneksi seperti ini, maka tidak luput dari adanya gangguan pada sistem yang menyebabkan terganggunya aliran daya yang mengalir diberbagai bagian dari sistem. Gangguan yang sering terjadi berupa gangguan pada saluran-saluran transmisi, dimana dapat menimbulkan kerusakan besar pada sistem khususnya dalam masalah peralihan (*transient*) yang akan tercakup dalam studi kestabilan.

Kestabilan sistem tenaga listrik harus memiliki tiga syarat penting yaitu keandalan (*reliability*), kualitas (*quality*) dan stabilitas (*stability*). *Reliability* merupakan kemampuan sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus-menerus, *quality* merupakan kemampuan sistem untuk menghasilkan besaran-besaran standar yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi, serta *stability* merupakan kemampuan dari sistem untuk kembali bekerja secara normal setelah mengalami gangguan.^[1]

Kestabilan dimaksud sebagai langkah nyata dalam upaya analisis stabilitas sistem tenaga listrik agar pembangkit yang terganggu tidak terlepas dari sistem. Sistem yang baik adalah sistem yang memiliki stabilitas yang tinggi yaitu sistem dapat kembali bekerja secara normal setelah mengalami gangguan. Dan sebaliknya, ketidak-stabilan suatu sistem adalah kehilangan sinkronisasi dari sistem itu sehingga permasalahan stabilitas terkait dengan penilaian mesin sinkron setelah gangguan.

Untuk memudahkan analisis, permasalahan stabilitas secara umum dibagi dalam tiga katagori utama yaitu stabilitas keadaan tunak (*steady state stability*), stabilitas dinamik (*dynamic stability*) dan stabilitas peralihan (*transient stability*). *Steady state stability* dipandang sebagai kemampuan sistem tenaga untuk kembali sinkron setelah menerima gangguan kecil. *Dynamic stability* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah terjadi gangguan kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. *Transient stability* dipandang pada gangguan yang mendadak seperti halnya pemutusan saluran, penambahan beban atau perubahan beban sehingga sistem akan kehilangan stabilitas karena gangguan yang terjadi diatas kemampuan sistem.

Pada penelitian ini akan dilakukan studi *transient stability* yang bertujuan untuk menganalisa kestabilan yang dapat membantu menentukan setting waktu *on/off* relai proteksi dan waktu pemutusan kritis *circuit breaker* sehingga dapat meminimalisir kerusakan yang terjadi akibat gangguan pada

saluran transmisi. *Transient stability* didasarkan pada aplikasi gangguan hubung singkat tiga fasa simetris pada multimesin (mesin majemuk). Gangguan hubung singkat tiga fasa simetris merupakan gangguan yang jarang terjadi pada sistem tenaga, namun merupakan gangguan yang paling parah dikarenakan besarnya arus gangguan sama di semua saluran. Data dan metode yang digunakan merupakan data IEEE 9 bus 3 mesin dengan metode Runge-Kutta orde 5. Pada penelitian ini akan menentukan waktu pemutusan kritis yang tepat untuk mengantisipasi terjadinya ketidakstabilan sistem tenaga listrik.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui kondisi stabilitas sistem tenaga listrik jika pada sistem tersebut terjadi kenaikan sudut rotor.
2. Mendapatkan waktu pemutusan kritis setiap saluran transmisi pada bus beban yang terganggu untuk mensimulasikan grafik sudut rotor pada masing-masing generator.
3. Mengetahui faktor yang mempengaruhi generator lepas dari sistem untuk dapat menentukan kestabilan sistem tenaga.

1.3. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Dapat memberikan informasi kestabilan sistem tenaga dari kurva ayunan sudut rotor yang dihasilkan.

2. Dapat mengetahui karakteristik stabilitas sistem tenaga yang mengalami gangguan sebagai acuan untuk perencanaan sistem proteksi yang baik.

1.4. Rumusan Masalah

Studi *transient stability* multimesin pada mesin sinkron dapat dipandang dari kestabilan mesin ketika terjadi gangguan di masing-masing saluran transmisi bus beban. Mesin yang terganggu akan mempengaruhi sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi. Pada penelitian ini akan diketahui bagaimana mendapatkan kurva ayunan sudut rotor yang dapat menampilkan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT) pada mesin yang terinterkoneksi serta bagaimana mesin dapat dikatakan stabil atau tidak stabil pada sistem tenaga listrik.

1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sistem pembangkitan tenaga listrik yang digunakan adalah sistem multimesin IEEE 9 bus 3 mesin (generator).
2. Penelitian ini dibatasi hanya di 12 lokasi gangguan saluran transmisi bus beban.
3. Metode yang digunakan untuk penyelesaian numerik adalah metode Runge-Kutta orde 5.
4. Tidak membahas aliran daya pada sistem multimesin IEEE 9 bus 3 mesin.
5. Perhitungan dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Matlab

1.6. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, tujuan, perumusan masalah, batasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi penjelasan secara umum yang berkaitan dengan materi yang dibahas, seperti penjelasan umum mengenai kestabilan sistem tenaga, persamaan ayunan dan metode Runge-Kutta orde 5.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memuat langkah-langkah penelitian yang dilakukan, yaitu waktu dan tempat penelitian, tahap-tahap penelitian dan diagram penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi penjelasan spesifik tentang hasil pengujian metode yang berbeda dengan data yang sama, hasil simulasi kurva ayunan data IEEE 9 bus 3 mesin dengan metode Runge-Kutta orde 5 di berbagai saluran transmisi bus-bus beban. Selanjutnya membahas hal yang menjadi tujuan penelitian ini.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik memiliki komponen utama yaitu pusat pembangkit, saluran transmisi dan sistem distribusi. Sistem tenaga listrik merupakan sekumpulan pusat atau pembangkit listrik dan gardu induk (pusat beban) yang satu sama lain dihubungkan oleh jaringan transmisi sehingga dapat membangkitkan, menyalurkan, membagi dan memanfaatkan tenaga listrik agar dapat mengalir sesuai kebutuhan.

Di dalam sistem tenaga listrik yang saling terinterkoneksi, maka dapat dimungkinkan bahwa sistem mengalami kerusakan atau gangguan. Gangguan yang sering terjadi pada saluran-saluran transmisi seperti gangguan tiga fasa simetris dapat menimbulkan kerusakan besar pada sistem, khususnya dalam masalah peralihan (*transient*) yang akan tercakup dalam studi kestabilan.

2.2. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Keseimbangan daya antara kebutuhan beban dengan pembangkitan generator merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik secara umum terdiri dari unit-unit pembangkit yang terhubung dengan saluran untuk melayani beban. Dalam buku Prabha Kundur, stabilitas sistem tenaga secara luas didefinisikan sebagai kemampuan dari suatu sistem

tenaga untuk tetap dalam kondisi operasi seimbang saat terjadi kondisi tidak normal dan dapat mengembalikan ke kondisi seimbang setelah terjadi gangguan.^[2] Ketidak-stabilan suatu sistem adalah kehilangan sinkron dari sistem, sehingga menimbulkan permasalahan dalam sistem jaringan yang menyebabkan terganggunya saluran transmisi dan kerusakan pada peralatan.

Secara umum klasifikasi stabilitas pada sistem tenaga listrik terkait dengan kestabilan sudut rotor (*rotor angle stability*), kestabilan frekuensi (*frequency stability*) dan kestabilan tegangan (*voltage stability*). Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan menjadi stabilitas sudut akibat gangguan kecil (*small disturbance angle stability*) dan stabilitas transien (*transient stability*). *Small disturbance angle stability* adalah kestabilan sistem untuk gangguan-gangguan kecil dalam bentuk osilasi elektromagnetik yang tak teredam dan terjadi terus menerus pada sistem karena variasi kecil dalam beban, sedangkan *transient stability* dikarenakan kurang sinkronnya torsi dan diawali dengan gangguan-gangguan besar.

Untuk mempermudah analisis, masalah stabilitas secara umum dibagi dalam tiga katagori utama yang bergantung pada sifat alami dan magnitude gangguan, yaitu :

1. Stabilitas keadaan tunak (*steady state stability*), kemampuan dari sistem tenaga untuk memperoleh kembali kesinkronan setelah terjadi gangguan kecil.
2. Stabilitas dinamik (*dynamic stability*), suatu kemampuan sistem tenaga

untuk kembali ke titik keseimbangan yang baru setelah timbul gangguan yang relatif kecil secara tiba-tiba dalam waktu yang lama. Analisa kestabilan dinamik ini lebih kompleks karena juga memasukan komponen kontrol otomatis dalam perhitungannya.

3. Stabilitas peralihan (*transient stability*), kemampuan sistem untuk mencapai kesinkronan setelah mengalami gangguan yang besar sehingga sistem kehilangan stabilitas akibat gangguan yang terjadi diatas kemampuan sistem.

2.3. Kestabilan Sistem Multimesin : Representasi Klasik

Sistem multimesin dapat ditulis sama dengan sistem persamaan satu mesin yang dihubungkan dengan *infinite bus*. Ketika menganalisis stabilitas *transient*, maka perlu adanya penyederhanaan atau pengandaian tambahan dengan asumsi-asumsi di bawah ini :

1. Sebagai mesin sinkron atau serempak direpresentasikan sebagai sumber tegangan konstan di samping reaktansi *transient* sumbu langsung.
2. Aksi governor diabaikan dan daya masukan diasumsikan selalu konstan selama keseluruhan periode simulasi.
3. Semua beban diubah menjadi admitansi ke ground dan diasumsikan konstan.
4. Redaman atau daya asinkron diabaikan.
5. Sudut mekanik rotor setiap mesin berhimpit dengan sudut tegangan di samping reaktansi mesin.^[3]

Model kestabilan sistem yang didasarkan pada asumsi-asumsi ini dinamakan

model kestabilan klasik (*classical stability model*).

2.4. Sistem Per-Unit

Pada analisa sistem tenaga, terdapat dua metode yang digunakan untuk mengatasi kesulitan atau kesalahan dalam perhitungan. Kedua metode perhitungan itu meliputi persentase dan sistem per-unit dimana keduanya lebih sederhana dalam perhitungan dibandingkan dengan menggunakan langsung nilai-nilai ampere, ohm dan volt yang sebenarnya. Kelebihan dari metode sistem per-unit ini adalah hasil perkalian dari dua kuantitas (dua nilai) yang dinyatakan dalam per-unit sudah langsung dalam per-unit juga. Sistem per-unit untuk suatu kuantitas merupakan perbandingan kuantitas tersebut terhadap nilai dasarnya :

$$\text{per - unit} = \frac{\text{nilai sebenarnya}}{\text{nilai base atau acuan}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Untuk nilai impedansi berdasarkan tegangan base (V_b) dan arus base (I_b) dan daya base (S_b) dapat dihitung :

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b}{\frac{S_b}{V_b}} = \frac{V_b^2}{S_b} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$S_{pu} = \frac{S}{S_b} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$V_{pu} = \frac{V}{V_b} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_b} \dots\dots\dots (2.6)$$

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.5. Stabilitas Peralihan (*Transient Stability*) Multimesin

Situasi yang lebih hebat akan terjadi bila pembangkitan dan beban besar hilang dari sistem atau terjadi gangguan pada saluran transmisi. Pada kasus semacam ini *transient stability* harus cukup kuat untuk mempertahankan diri terhadap kejutan atau perubahan beban yang relatif besar terjadi. Setelah hilangnya pembangkitan atau beban besar secara tiba-tiba, keseimbangan antara energi *input* dan *output* listrik pada sistem akan hilang. Jika energi *input* tidak lagi mencukupi, inersia rotor mesin yang masih bekerja pada periode yang singkat akan melambat. Apabila beban hilang maka energi *input* pada sistem akan melebihi beban listrik, dan mesin akan bergerak semakin cepat.

Masalah kestabilan peralihan dapat lebih lanjut dibagi kedalam dua bagian yang meliputi :^[4]

- kestabilan ayunan pertama (*first swing*), kestabilan ini didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukkan sistem pengaturannya. Biasanya periode waktunya adalah detik pertama setelah timbulnya gangguan pada sistem. Bila mesin dikatakan berada dalam kondisi sinkron sebelum berakhirnya detik pertama, maka sistem ini dikatakan stabil.
- Kestabilan ayunan majemuk (*multiswing*), kestabilan ini mencakup periode telaah yang lebih lama, dan karenanya harus mempertimbangkan juga pengaruh sistem pengaturan generator terhadap kinerja mesin didalam periode waktu yang cukup lama.

Persamaan ayunan dengan mengabaikan redaman dapat ditulis dengan persamaan :

$$\frac{H_i}{\pi \cdot f_0} \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = P_{mi} - \sum_{j=1}^m |E'_i| |E'_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots \dots \dots (2.8)$$

dimana, Y_{ij} adalah elemen-elemen matriks admitansi bus gangguan yang direduksi. H_i adalah konstanta inersia mesin i yang dinyatakan dalam MJ/MVA.

Daya listrik diperlihatkan generator ke- i oleh P_e dan perubahan persamaan (2.8) ke dalam model variabel keadaan dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dt} &= \omega_i & i &= 1, \dots, m \\ \frac{d\omega_i}{dt} &= \frac{\pi \cdot f_0}{H_i} (P_m - P_e) & & \dots \dots \dots (2.9) \end{aligned}$$

Sistem daya listrik masa kini jauh lebih luas, ditambah interkoneksi antar sistem yang rumit dan saling mempengaruhi. Kisaran masalah yang dianalisis banyak menyangkut gangguan yang besar dan tidak lagi memungkinkan menggunakan proses kelinearan, sehingga persamaan non linier differensial dan aljabar harus diselesaikan dengan metode iterasi. Untuk menganalisa *transient stability*, memiliki beberapa langkah yang harus dilakukan meliputi :

- a. Menyelesaikan aliran daya untuk mendapatkan *magnitude* tegangan bus dan sudut fasa. Menghitung arus mesin sebelum gangguan dihitung dengan persamaan :

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*}, \quad \text{dimana } i = 1, 2, \dots, m \quad \dots \dots \dots (2.10)$$

dimana m adalah jumlah generator, V_i adalah tegangan terminal generator ke- i , P_i dan Q_i adalah daya nyata dan daya reaktif generator. Semua harga

yang tidak diketahui ditentukan dari penyelesaian aliran daya.

- b. Menghitung tegangan di samping reaktansi *transient* dengan mengabaikan resistansi jangkar generator yang ditentukan dari persamaan :

$$E' = V_t + jX'_d I \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

- c. Mengubah semua beban menjadi admitansi ekivalen dengan menggunakan persamaan :

$$Y_L = \frac{S_L^*}{|V_L|^2} = \frac{P_L - jQ_L}{|V_L|^2} \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana $P_L + jQ_L$ adalah bebannya dan $|V_L|$ adalah besar tegangan.

- d. Menghitung matriks Ybus (matriks $n \times n$) pada kondisi sebelum gangguan (*prefault*), selama gangguan (*faulted*) dan setelah gangguan yang dihilangkan (*postfault*).

- e. Menentukan matriks reduksi bus (Ybus) menggunakan *Kron's Reduction* dengan persamaan :

$$Y_{bus}^{reduksi} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-t} Y_{nm} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Matriks admitansi reduksi bus berdimensi $m \times m$, dengan m adalah jumlah generator.

- f. Menentukan persamaan daya elektrik P_{ei} sebelum gangguan antara daya masukan dan keluaran daya listrik :

$$P_{ei} = \sum_{j=1}^m |E'_i| |E'_j| |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

- g. Menyelesaikan kurva ayunan (*swing curve*) menggunakan metode Runge-Kutta Orde 5 dengan persamaan :

$$\frac{H}{\pi f} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ pu} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

2.6. Rotor Angle Stability

Pada sistem tenaga listrik, sudut rotor dan kecepatan dari generator sinkron merupakan kuantitas terpenting. Stabilitas sudut rotor (*rotor angle stability*) adalah kemampuan dari generator sinkron untuk tetap mempertahankan atau mencapai sinkronisasi dalam kondisi normal setelah mengalami gangguan. Ketika terdapat dua atau lebih generator sinkron yang terinterkoneksi, tegangan pada stator dan arus pada semua generator harus memiliki frekuensi yang sama dan kecepatan mekanik rotornya harus sama akibat frekuensi yang sama.

Stabilitas bergantung pada kemampuan masing-masing generator untuk tetap mempertahankan keseimbangan antara masukan generator dan keluaran generator.^[5] Perubahan dari keluaran generator ini mengikuti sebuah gangguan yang dibagi ke dalam dua komponen yaitu T_S dan T_D . T_S mewakili koefisien *synchronizing torque* yang menentukan perubahan dalam fasa dengan gangguan sudut rotor $\Delta\delta$ dan T_D mewakili *damping torque* yang menentukan perubahan *torque* dalam fasa dengan selisih kecepatan $\Delta\omega$. Hubungan kedua komponen tersebut dapat dilihat dengan persamaan :

$$\Delta T_e = T_S + T_D \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

2.7. Persamaan Ayunan (*Swing Equation*)

Untuk menganalisis kestabilan suatu sistem tenaga listrik, maka harus membangun model matematika yang dapat menggambarkan dinamika sistem tenaga listrik saat ada gangguan besar. Model matematika yang dipakai untuk

pembangkit listrik adalah persamaan ayunan (*swing equation*). Persamaan ayunan adalah persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin sinkron yang didasarkan pada prinsip dalam dinamika yang menyatakan :

“momen putar percepatan (*accelarating torque*) adalah hasil kali momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya”.[5]

Untuk generator sinkron, persamaan ayunan ditulis :

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{ Nm..... (2.17)}$$

dimana :

J = momen kelembaman total dari massa rotor (kg-m²)

θ_m = pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang diam (radian mekanis)

T_a = momen putar percepatan bersih (N-m)

T_m = momen putar mekanis atau poros (penggerak mula) (N-m)

T_e = momen putar listrik/elektromagnetis (N-m)

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

$$T_m = T_e$$

Jika terjadi gangguan akan menghasilkan suatu percepatan ($T_m > T_e$) atau perlambatan ($T_m < T_e$) dengan :

$$T_a = T_m - T_e$$

Pada persamaan (2.17) yaitu θ_m diukur terhadap sumbu yang diam maka untuk mendapatkan posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron maka persamaan menjadi :

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \text{ (2.18)}$$

dimana, δ_m adalah pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron (radian). Penurunan persamaan (2.18) terhadap waktu memberikan kecepatan putaran rotor dengan persamaan berikut :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{\omega_{sm} t}{dt} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

dengan percepatan rotor adalah :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Mensubstitusikan persamaan (2.17) ke dalam (2.20) diperoleh :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Mengalikan persamaan (2.22) dengan ω_m akan menghasilkan :

$$J \omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

Karena kecepatan putar dikali torsi adalah sama dengan daya, maka persamaan di atas dapat ditulis dengan persamaan daya :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad \dots\dots\dots (2.24)$$

dimana $J\omega_m$ adalah momentum sudut rotor yang dapat dinyatakan dalam M dengan satuan $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ radian/detik. Hubungan energi kinetik dengan massa berputar adalah :

$$W_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2}M\omega_m \text{ atau } M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad \dots\dots\dots (2.25)$$

Bila kecepatan putar rotor ω_m tidak berubah sebelum stabilitas hilang, maka momentum sudut M dievaluasi pada kecepatan serempak ω_{sm} , sehingga dapat dikatakan putaran rotor $\omega_m =$ putaran serempak rotor ω_{sm} sebagai berikut :

$$M = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \dots\dots\dots (2.26)$$

Persamaan ayunan dalam hubungannya dengan momentum sudut M adalah :

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e MW \dots\dots\dots (2.27)$$

Persamaan (2.25) lebih sesuai untuk menuliskan persamaan ayunan dengan parameter sudut daya listrik δ . Jika p adalah jumlah kutub generator serempak maka sudut daya listrik δ dalam hubungannya dengan sudut daya mekanik δ_m adalah :

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \text{ dan } \omega = \frac{p}{2} \omega_m \dots\dots\dots (2.28)$$

Persamaan (2.25) persamaan ayunan dalam bentuk persamaan daya, dibentuk kedalam sudut daya listrik. Dengan menggunakan persamaan (2.26) maka didapat persamaan ayunan dengan sudut daya listrik dalam bentuk persamaan daya adalah :

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \dots\dots\dots (2.29)$$

Jika harga momentum sudut M dari persamaan (2.26) disubstitusikan ke persamaan (2.29) dan dibagi dengan daya dasar S_B , menghasilkan :

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm} S_B} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m - P_e}{S_B} \dots\dots\dots (2.30)$$

Akan diperoleh persamaan di bawah ini ketika mensubstitusikan $H = W_k/S_B$ ke dalam persamaan (2.30) :

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2H}{\omega_{sm}} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (\text{pu}) \dots\dots\dots (2.31)$$

Dengan H adalah konstanta inersia (MJ/MVA), W_k adalah energi kinetik dalam MJ pada kecepatan sinkron dan S_B adalah rating mesin dalam MVA.

Kecepatan putar elektrik dalam hubungannya dengan kecepatan putar mekanik adalah $\omega_{sm} = \frac{2}{p} \omega_s$, sehingga persamaan (2.31) menjadi :

$$\frac{2H}{\omega_s} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \dots\dots\dots (2.32)$$

Mensubstitusikan $\omega = 2 \pi f$ ke dalam persamaan (2.32) diperoleh :

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (\text{pu}) \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

dengan δ dalam radian. Jika δ dinyatakan dalam derajat, maka persamaan ayunan menjadi :

$$\frac{H}{180.f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (\text{pu}) \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

Satuan pada konstanta poros berputar masih dalam british unit. Untuk lebih memudahkan di konversikan kedalam Satuan Internasional (SI).

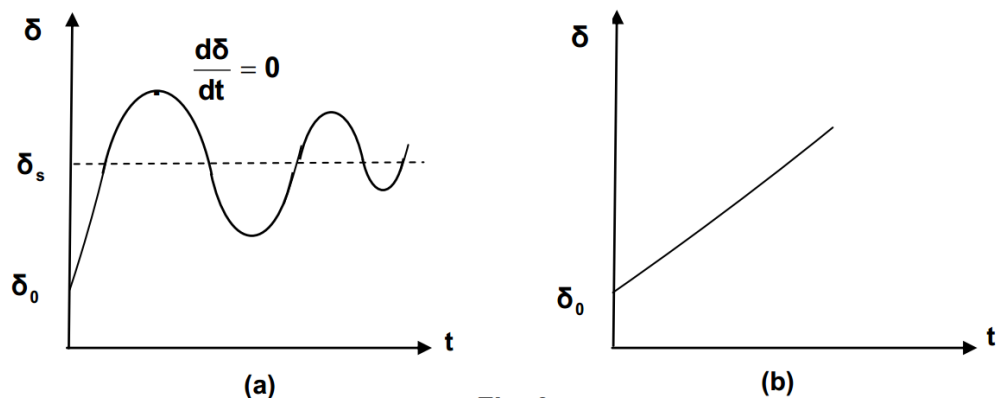
Untuk momen inersia :

$$J(kgm^2) = WR^2 x \frac{1.356}{32.2} \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

Untuk mencari konstanta inersia (H) :

$$H(MJ/MVA) = \frac{\frac{1}{2}J(\frac{2\pi.rpm}{50})^2}{S} \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

Pada persamaan (2.33) dan (2.34) di atas merupakan persamaan ayunan (*swing equation*) dimana persamaan dasar yang mengatur dinamika (gerak) perputaran mesin sinkron dalam kestabilan peralihan. Grafik dalam penyelesaian persamaan di atas disebut “Kurva Ayunan” (*swing curve*) mesin, dan dengan meneliti kurva ayunan semua mesin dalam sistem daya dapat diselesaikan dalam besaran δ terhadap waktu. Pada grafik di bawah ini, akan terlihat sebuah sistem *stable* atau *unstable* yang diperlihatkan pada grafik 2.1. (a) dan (b) :



Grafik 2.1. Grafik δ terhadap t untuk (a) sistem *stable* dan (b) *unstable*.^[6]

2.8. Gangguan Tiga Fasa Seimbang

Pada sistem tenaga listrik terdapat jenis gangguan berupa gangguan seimbang dan gangguan tak seimbang. Jenis gangguan tidak seimbang meliputi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (ground), antarfasa dan dua fasa ke tanah. Studi gangguan dapat digunakan untuk menentukan *setting* relay proteksi. Gangguan tiga fasa seimbang didefinisikan sebagai gangguan *Short Circuit* (SC) atau hubung singkat tiga fasa dimana gangguan itu tidak sering terjadi, akan tetapi merupakan tipe gangguan yang paling parah karena pada setiap saluran arus gangguan sama besarnya.^[3]

2.9. Pendekatan Analisis Stabilitas Peralihan (*Transient Stability*)

Pada studi analisis *transient stability* terdapat dua pendekatan meliputi *Time Domain Simulation* (TDS) dan *direct method*.^[9] Kedua pendekatan ini akan dipaparkan sebagai berikut :

2.9.1. Pendekatan *Time Domain Simulation* (TDS)

TDS merupakan metode tidak langsung (*indirect method*) yang memecahkan

permasalahan stabilitas peralihan menggunakan penyelesaian numerik persamaan differensial nonlinear melalui *step by step* untuk menghitung setiap mesin dari kurva ayunan (sudut rotor terhadap waktu). Pendekatan TDS ini akan mensimulasikan sistem dalam periode selama gangguan (*faulted*) dan setelah gangguan (*postfault*) serta waktu pemutusan gangguan yang ditemukan berupa antara waktu stabil dan tidak stabil (secara tidak langsung). Pada umumnya, mensimulasikan periode selama gangguan cukup singkat (misalnya, 100 ms atau lebih) sedangkan untuk periode setelah gangguan biasanya memakan waktu yang lebih lama yaitu sistem yang tidak kehilangan sinkron setelah beberapa detik dianggap sistem kondisi stabil.

Periode simulasi maksimum tergantung pada karakteristik dari sistem tenaga yang baik dari segi pemodelannya. Hal ini biasanya tidak melebihi 15 detik untuk pemodelan sistem yang rinci, sementara 3 detik dianggap cukup untuk pemodelan sistem yang sederhana atau klasik.^[10]

2.9.2. Pendekatan *Direct Method*

Direct Method merupakan metode langsung, dimana dalam mendapatkan waktu pemutusan gangguan yang dihasilkan langsung dapat ditemukan. Pendekatan ini tidak menggunakan penyelesaian numerik untuk mendapatkan waktu pemutusan gangguan, tetapi menggunakan penyelesaian *energy function (lyapunov)*. *Energy function* merupakan metode perhitungan langsung yang berhubungan dengan energi kinetik dan energi potensial.^[11]

2.10. Waktu Pemutusan Kritis atau *Critical Clearing Time (CCT)*

Jika sistem tidak dapat menangani gangguan yang terjadi tepat pada waktunya, maka sistem dinyatakan tidak stabil. Ketidak-stabilan ini mempengaruhi seluruh sistem yang ada. Oleh sebab itu, perlu adanya penentuan waktu pemutusan kritis untuk menghindari gangguan-gangguan yang ada. Waktu pemutusan kritis merupakan waktu kritis yang dibutuhkan generator sinkron untuk mempertahankan kondisi generator tetap dalam sinkronisasi. Sistem tenaga listrik menjadi tidak stabil ketika sudut rotor δ menjadi lebih besar. Dengan adanya kenaikan δ ini, sangat mempengaruhi perubahan daya. Sehingga, dengan diperolehnya sudut rotor maka waktu pemutusan kritis dapat ditentukan.

2.11. Metode Runge-Kutta Orde 5

Metode Runge-Kutta mencapai ketelitian suatu pendekatan Deret Taylor tanpa memerlukan kalkulasi turunan yang lebih tinggi. Metode ini termasuk kedalam metode yang penyelesaiannya menggunakan penyelesaian numerik persamaan diferensial nonlinear untuk memplot kurva ayunan sudut rotor. Metode Runge-Kutta mencakup orde 1 hingga orde yang lebih tinggi (5). Metode dengan orde yang lebih tinggi mencapai akurasi yang lebih baik untuk upaya komputasi yang sama.^[12] Untuk mendapatkan ketelitian dan keakuratan yang lebih baik maka menggunakan metode Runge-Kutta orde 5 sebagai orde yang tinggi. Dengan penyelesaian metode Runge-Kutta Orde 5 untuk menentukan harga δ dan ω , terlebih dahulu harus menentukan harga-harga $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, l_1, l_2, l_3, l_4, l_5$ dan l_6 sebagai berikut :^[7]

$$k_1 = f(\delta_i \omega_i) \Delta t = \omega_i \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

$$l_1 = g(\delta_i \omega_i) \Delta t = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.38)$$

$$k_2 = f\left(\delta_i + \frac{1}{4}k_1, \omega_i + \frac{1}{4}l_1\right) \Delta t = (\omega_i + \frac{1}{4}l_1) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.39)$$

$$l_2 = g\left(\delta_i + \frac{1}{4}k_1, \omega_i + \frac{1}{4}l_1\right) \Delta t = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e \sin(\delta_i + \frac{1}{4}k_1)) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.40)$$

$$k_3 = f\left(\delta_i + \frac{1}{4}k_2, \omega_i + \frac{1}{8}l_1 + \frac{1}{8}l_2\right) \Delta t = (\omega_i + \frac{1}{8}l_1 + \frac{1}{8}l_2) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.41)$$

$$\begin{aligned} l_3 &= g\left(\delta_i + \frac{1}{4}k_2, \omega_i + \frac{1}{8}l_1 + \frac{1}{8}l_2\right) \Delta t \\ &= \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e \sin(\delta_i + \frac{1}{4}k_2)) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.42) \end{aligned}$$

$$k_4 = f\left(\delta_i + \frac{1}{2}k_3, \omega_i - \frac{1}{2}l_2 + l_3\right) \Delta t = (\omega_i - \frac{1}{2}l_2 + l_3) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.43)$$

$$\begin{aligned} l_4 &= g\left(\delta_i + \frac{1}{2}k_3, \omega_i - \frac{1}{2}l_2 + l_3\right) \Delta t \\ &= \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e \sin(\delta_i + \frac{1}{2}k_3)) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.44) \end{aligned}$$

$$k_5 = f\left(\delta_i + \frac{3}{4}k_4, \omega_i + \frac{3}{16}l_1 + \frac{9}{16}l_4\right) \Delta t = (\omega_i + \frac{3}{16}l_1 + \frac{9}{16}l_4) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.45)$$

$$\begin{aligned} l_5 &= g\left(\delta_i + \frac{3}{4}k_4, \omega_i + \frac{3}{16}l_1 + \frac{9}{16}l_4\right) \Delta t \\ &= \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e \sin(\delta_i + \frac{3}{4}k_4)) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.46) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_6 &= f\left(\delta_i + k_5, \omega_i - \frac{3}{7}l_1 + \frac{2}{7}l_2 + \frac{12}{7}l_3 - \frac{12}{7}l_4 + \frac{8}{7}l_5\right) \Delta t \\ &= \left(\omega_i - \frac{3}{7}l_1 + \frac{2}{7}l_2 + \frac{12}{7}l_3 - \frac{12}{7}l_4 + \frac{8}{7}l_5\right) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.47) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_6 &= g\left(\delta_i + k_5, \omega_i - \frac{3}{7}l_1 + \frac{2}{7}l_2 + \frac{12}{7}l_3 - \frac{12}{7}l_4 + \frac{8}{7}l_5\right) \Delta t \\ &= \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e \sin(\delta_i + k_5)) \Delta t \quad \dots\dots\dots (2.48) \end{aligned}$$

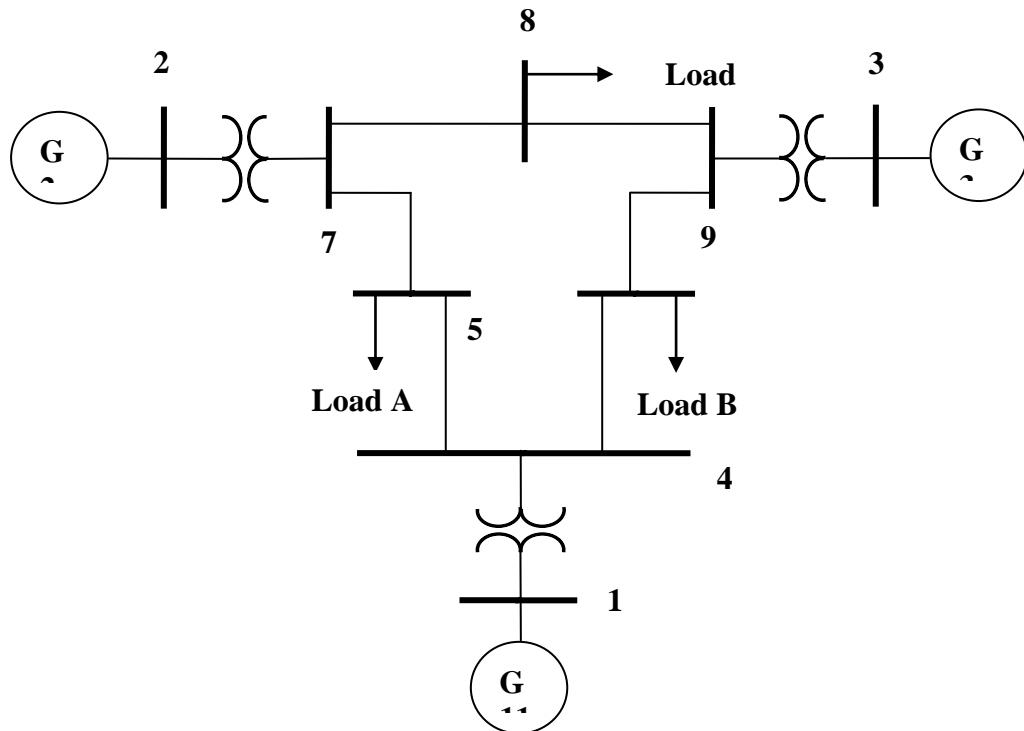
Sehingga harga δ dan ω dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan :

$$\delta_{i+1} = \delta_i + \frac{1}{90} (7k_1 + 32k_3 + 12k_4 + 32k_5 + 7k_6) \dots\dots\dots(2.49)$$

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \frac{1}{90} (7l_1 + 32l_3 + 12l_4 + 32l_5 + 7l_6) \dots\dots\dots(2.50)$$

2.12. Sistem Kelistrikan Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Di bawah ini merupakan diagram segaris sistem kelistrikan data model IEEE 9 Bus 3 Mesin yang diperlihatkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Sistem kelistrikan model IEEE 9 Bus 3 Mesin.^[8]

Bus_1 sebagai Slack Bus, Bus_2 dan Bus_3 sebagai PV Bus, Base 100 MVA.

Adapun data sistem tenaga listrik Model IEEE 9 Bus 3 Mesin berikut :

Tabel 2.1. Data Tegangan dan Tipe Bus Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Bus	Tegangan (pu)	Jenis Bus
1	$1.0400\angle 0^0$	Slack Bus
2	$1.0250\angle 9.3^0$	PV Bus
3	$1.0250\angle 4.7^0$	PV Bus
4	$1.0260\angle -2.2^0$	PQ Bus
5	$1.9960\angle -4.0^0$	PQ Bus
6	$1.0130\angle -3.7^0$	PQ Bus
7	$1.0260\angle 3.7^0$	PQ Bus
8	$1.0160\angle 0.7^0$	PQ Bus
9	$1.0320\angle 2.0^0$	PQ Bus

Tabel 2.2. Data Pembangkitan dan Beban Tiap Bus Model IEEE 9 Bus 3

Mesin

Bus	Pembangkitan		Beban	
	Daya aktif P (pu)	Daya reaktif Q (pu)	Daya aktif P (pu)	Daya reaktif Q (pu)
1	0.7164	0.2705	0.0000	0.0000
2	1.6300	0.0670	0.0000	0.0000
3	0.8500	-0.1090	0.0000	0.0000
4	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
5	0.0000	0.0000	1.2500	0.5000
6	0.0000	0.0000	0.9000	0.3000
7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
8	0.0000	0.0000	1.0000	0.3500
9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tabel 2.3. Data Saluran dan Line Charging Model IEEE 9 Bus 3 Mesin

Saluran		Impedansi Z (pu)		Suseptansi B/2 (pu)
Dari Bus	Ke Bus	Resistansi R (pu)	Reaktansi X (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	0.0850	0.0880
4	6	0.0170	0.0920	0.0790
5	7	0.0320	0.1610	0.1530
6	9	0.0390	0.1700	0.1790
7	8	0.0085	0.0720	0.0745
8	9	0.0119	0.1008	0.1045

Tabel 2.4. Data Pembangkit Sistem Tenaga Listrik Model IEEE 9 Bus 3
Mesin

Parameter	Generator		
	1	2	3
Rated MVA	247.5000	192.0000	128.0000
kV	16.5000	18.0000	13.8000
Power Factor	1.0000	0.8500	0.8500
Type	hydro	steam	Steam
Speed	180 rpm	3600 rpm	3600 rpm
X'd	0.0608	0.1198	0.1813
H	23.6400	6.4000	3.0100

2.13. Studi Stabilitas Peralihan (*Transient Stability*)

Pengujian hasil simulasi program dengan metode yang diusulkan akan

ditelaah dengan hasil simulasi dari penelitian-penelitian sebelumnya. Di bawah ini beberapa penelitian terdahulu mengenai hasil kurva ayunan di masing-masing mesin :

Pada tahun 2008, Heru Dibyo Laksono melakukan penelitian tugas akhir “Studi Kestabilan *Transient* Sistem Tenaga Listrik Multimesin (Model IEEE 9 Bus 3 Mesin)”.^[13] Penelitian ini menggunakan perangkat lunak Matlab dengan contoh kasus sistem tenaga listrik Model IEEE 9 bus 3 mesin dan waktu pemutusan gangguan sebesar 0.2 detik atau lebih cepat pada periode waktu simulasi 3 detik. Tujuan dari simulasi ini untuk mengetahui unjuk kerja kestabilan sistem tenaga listrik jika pada sistem tersebut terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa simetris pada saluran transmisi. Pada penelitian ini memberikan kesimpulan bahwa permasalahan studi kestabilan peralihan ini secara matematis dapat dinyatakan dengan dua persamaan yaitu persamaan aljabar dan differensial. Sistem persamaan aljabar terdiri dari persamaan mantap untuk beban, saluran transmisi, transformator dan terminal generator sedangkan persamaan differensial menggambarkan kondisi dinamis rotor generator seperti kecepatan rotor.

Pada tahun 2010, salah satu penelitian terdahulu yaitu pada referensi buku yang berjudul “Sistem Tenaga Listrik (Contoh Soal dan Penyelesaiannya Menggunakan MATLAB)” dengan pengarang Cekmas Cekdin dan penerbit Andi Yogyakarta.^[3] Pada hasil simulasi yang diperlihatkan pada referensi meliputi hasil grafik kurva ayunan antara mesin 1 dan 2 terhadap kondisi stabil dan tidak stabil. Pada pengujian ini, terdapat sistem transmisi 230 kV, 60 Hz yang mempunyai dua buah generator dan sebuah *infinite bus* serta

diperlukannya suatu program yang dapat memberikan nilai matriks admitansi reduksi bus dan daya elektrik secara langsung tanpa menghitung manual terlebih dahulu.

Pada tahun 2010, Bessie Baakanyang Monchusi melakukan penelitian yang berjudul “*Optimal Approach Towards Using Phasor Measurement (PMU) Data in Equal Area Criterion Based systems for Power System Transient Stability Assessment*”.^[14] Penelitian ini menjelaskan solusi untuk memperoleh tegangan generator, arus dan fluks ketika akan mengetahui kuantitas fasa pada kondisi *transient*. Metode yang dijelaskan pada penelitian ini mencakup banyak metode yang mendukung analisa *transient stability* berupa *Equal Area Criterion* (EAC), *Centre of Angles* (COA) dan Runge-Kutta untuk memperoleh nilai waktu pemutusan gangguan.

Pada tahun 2010, Dikpride Despa melakukan penelitian pada *thesis* “*Application of Phasor Measurement Unit (PMU) Data for Out Of Step Detection*”.^[15] Penelitian ini menjelaskan mengenai algoritma pada metode *Equal Area Criterion* (EAC) sebagai salah satu metode langsung mendapatkan waktu pemutusan kritis untuk menganalisis kestabilan pembangkit bila terjadi gangguan tiga fasa ke tanah. Persamaan yang digunakan berfungsi untuk menghitung luas area berupa percepatan dan perlambatan dengan hubungan kurva antara daya (P) dan delta (δ). Data yang dianalisis merupakan data *Phasor Measurement Unit* (PMU) dengan 4 generator untuk mendeteksi kondisi *out of step* sistem tenaga. Perangkat lunak (*software*) yang digunakan untuk simulasi penelitian ini adalah *Matlab* dan *Dymola* dengan *ObjectStab*.

Pada tahun 2012, Heru Dibyo Laksono dan Maherianto melakukan penelitian pada tugas akhir “Studi Stabilitas Peralihan Multimesin pada Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Euler (Studi Kasus : PT. PLN P3B Sumatera).^[16] Penelitian ini menggunakan Metode Euler dalam mendapatkan waktu pemutusan kritis gangguan pada studi kasus PT. PLN P3B Sumatera. PT. PLN P3B Sumatera memiliki dua subsistem besar yaitu subsistem Sumatera Bagian Utara (Sumbagut) dan Sumatera Bagian Selatan Tengah. Metode Euler merupakan salah satu metode yang penyelesaiannya menggunakan persamaan differensial nonlinier pada persamaan ayunan. Kelemahan pada penelitian ini terletak pada metode yang digunakan dimana metode ini kurang teliti dalam menentukan tingkat keakuratan pada perhitungan sudut rotor.

Pada tahun 2012, Surya Atmaja melakukan penelitian pada tugas akhir “Perhitungan *Critical Clearing Time* dengan Menggunakan Metode Time Domain Simulation (TDS)”.^[17] Penelitian ini dijelaskan bagaimana mendapatkan *Critical Clearing Time* (CCT) dengan metode TDS. Metode TDS merupakan metode yang hanya dapat digunakan dengan cara *trial error*, sehingga nilai CCT didapatkan antara waktu stabil dan waktu tidak stabil. Pada penelitian ini menghitung penyelesaian delta dan omega menggunakan Runge-Kutta orde 4 dengan salah satu model data IEEE sistem 9 bus 3 mesin seperti pada gambar 2.2. yang diambil 9 titik gangguan di salurannya secara acak. Kelemahan pada penelitian ini terletak pada metode yang digunakan. Metode runge-kutta orde 4 telah memberikan hasil yang baik dalam mendapatkan kurva ayunan, akan tetapi belum memberikan keakuratan pada

hasil sudut rotornya. Sehingga, perlu metode lain yang lebih akurat dalam mendapatkan sudut rotor dan kecepatan rotornya seperti metode runge-kutta orde 5.

Pada tahun 2013, Kiran Mishra dan Mrs. Sheetal .V. Umredkar pada *paper International Journal of Science and Research (IJSR) India* yang berjudul “Transient Stability Analysis of Multi Machine System” pada bulan April 2013.^[18] Pada *paper* tersebut memaparkan bahwa masalah *transient stability* memerlukan evaluasi atau analisa kemampuan sistem tenaga untuk menahan gangguan tetap pada kondisi stabil dan menjaga kualitas layanan. *Paper* ini memperkenalkan sebuah metode algoritma yang cukup akurat untuk menganalisa *transient stability* pada *Single Machine Infinite Bus (SMIB)* maupun *multi machine* dengan sistem 6 bus 3 generator. Untuk sistem multimesin, metode algoritma yang dijelaskan menggunakan persamaan numerik seperti subbab sebelumnya pada persamaan 2.8 sampai 2.15. Persamaan ini akan digunakan pula pada hasil simulasi program di penelitian menggunakan metode Runge-Kutta orde 5.

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

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

3.2. Alat dan Bahan

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

3.2.1. Data Sekunder Sistem IEEE 9 Bus 3 Mesin

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 (X'_d).

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).

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.

3.2.2. *Hardware (Personal Computer/Laptop)*

Jenis *hardware* yang digunakan sebagai perangkat keras pendukung penelitian ini adalah laptop ASUS K43U Vision and Radeon HD6310M.

3.2.3. *Software*

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

3.3. Tahap Pembuatan Penelitian

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

3.3.1. 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 *transient* multimesin.

3.3.2. Perancangan dan Pembuatan Perangkat Simulasi

Dalam tahapan ini dimaksudkan untuk merancang, 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.

3.3.3. Pengambilan Data

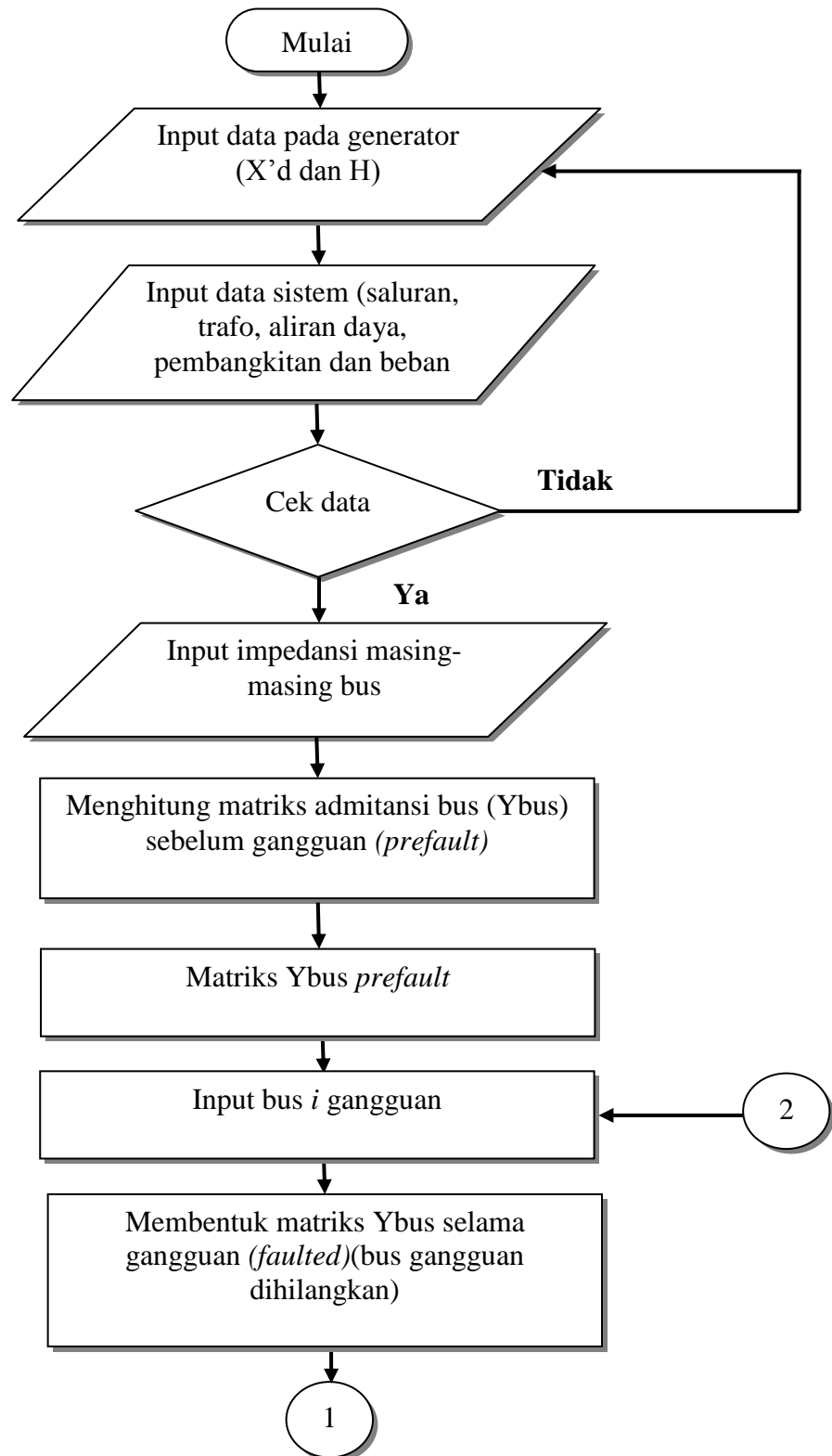
Pada tahap ini dimaksudkan untuk mengambil data dari program simulasi yang dibuat. Data yang diambil berupa data kurva ayunan sudut rotor untuk mendapatkan waktu pemutusan kritis gangguan pada masing-masing saluran transmisi bus beban.

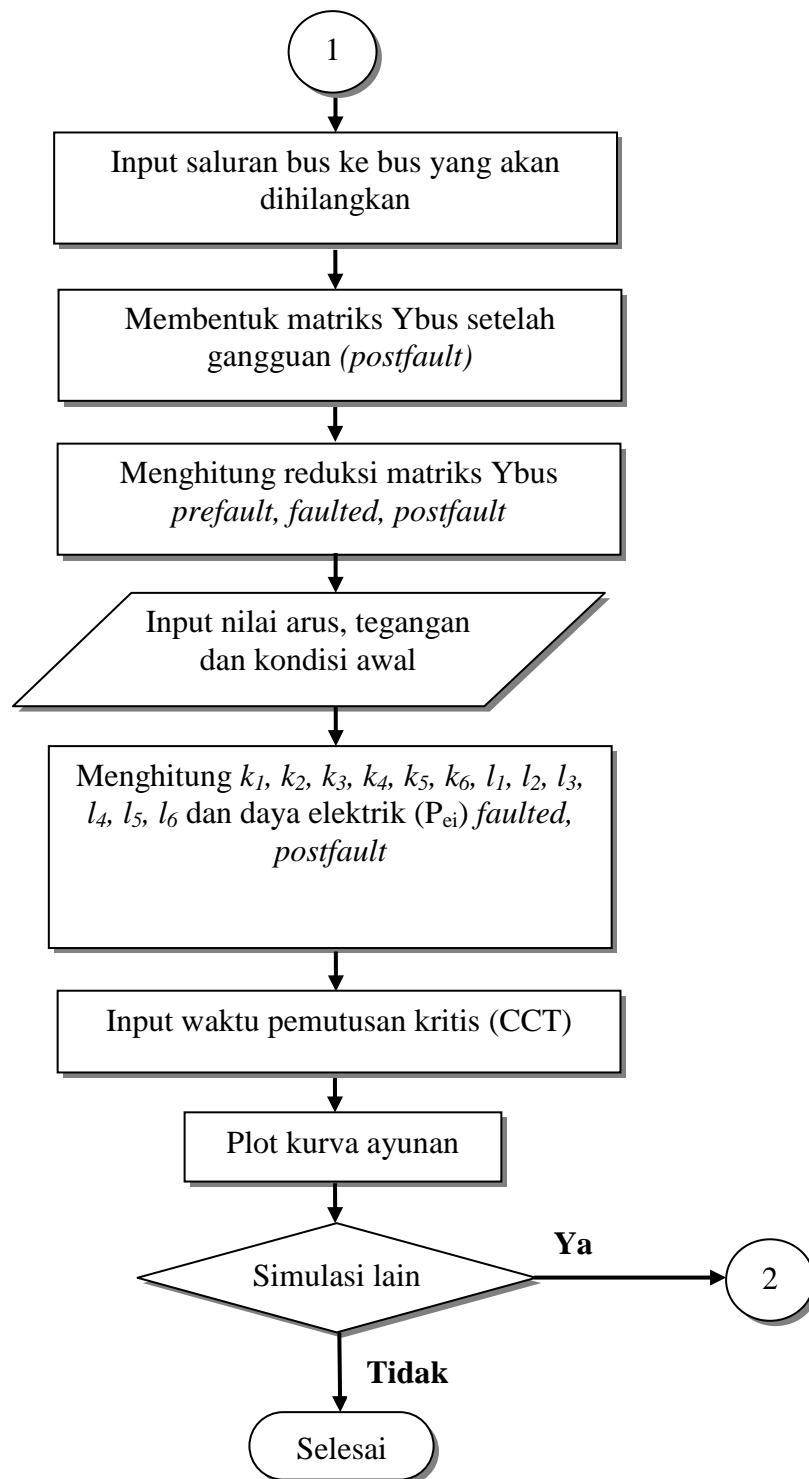
3.3.4. Analisis dan Pembahasan

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

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian, dapat disimpulkan bahwa:

1. Metode *Time Domain Simulation* (TDS) dapat memecahkan permasalahan *transient stability* menggunakan penyelesaian numerik persamaan differensial nonlinear (metode Runge-Kutta orde 5) melalui *step by step* untuk menghitung setiap mesin dari kurva ayunan.
2. Dari hasil simulasi, didapatkan bahwa semakin lama waktu pemutusan gangguan maka semakin besar sudut rotor yang dapat menyebabkan mesin kehilangan kestabilannya.
3. Dari 12 titik gangguan yang disimulasikan pada sistem IEEE 9 bus 3 generator didapatkan waktu pemutusan gangguan tercepat saat 0.14 – 0.15 detik pada SC bus 7 sedangkan SC bus 6 memiliki waktu pemutusan gangguan terlama (besar) lebih dari 1 detik.
4. Faktor yang mempengaruhi generator kehilangan kestabilannya atau lepas dari sistem meliputi lokasi gangguan, pembebanan, waktu pemutusan dan reaktansi saluran.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil pembahasan dan kesimpulan diatas dapat disarankan bahwa :

1. Pada penelitian selanjutnya, sebaiknya menggunakan metode berorde lebih tinggi (metode *multistep*) dalam penyelesaian numerik persamaan differensial nonlinear untuk mendapatkan tingkat akurasi yang lebih baik pada hasil grafik kurva ayunan.
2. Menggunakan metode *direct method* (langsung) dalam menentukan waktu pemutusan kritis gangguan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rosalina. 2010. *Analisa Kestabilan*. FT UI: Bab 2.
- [2] Kundur, Prabha. 1994. *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, Inc.
- [3] Cekdin, Cekmas. 2007. *Sistem Tenaga Listrik-Contoh Soal dan Penyelesaian Menggunakan Matlab*. Yogyakarta: ANDI.
- [4] A.Pongtiku, James and Maickel Tuegeh. 2014. *Analisa Stabilitas Transien Untuk Menentukan Waktu Pemutusan Kritis (Critical Clearing Time) Pada Jaringan Transmisi 70 kV PLTA Tanggari II-GI Sawangan Dengan Menggunakan Program Matlab*. Manado: International Standard Serial Number (ISSN) : 2301-8402.
- [5] D.Stevenson, William. 1983. *Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat*. Jakarta: Erlangga.
- [6] Kumar, Dr. B. Kalyan. *Power System Stability and Control*. India: Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Madras.
- [7] Hermawan. 2009. *Analisa Pengaruh Pemasangan Kompensator Kapasitor Seri Terhadap Stabilitas Sistem*. Semarang: Seminar Nasional Electrical, Informatics, And It's Education 2009.
- [8] Wang, Xi-Fan dkk. 2008. *Modern Power Systems Analysis*. New York: springer.com Library of Congress Control Number : 2008924670

- [9] Ayasun, Saffet dkk. 2005. *A Sensitivity Approach For Computation of The Probability Density Function of Critical Clearing Time and Probability of Stability in Power System Transient Stability Analysis*. USA: Applied Mathematics and Computation 176 (2006) 563-576
- [10] Pavella. Mania dkk. 1998. *Transient Stability of Power Systems (A Unified Approach to Assessment and Control)*. London: University of Liege, Belgium
- [11] Aziz Al Haqim, M. Abdul dkk. 2014. *Perhitungan Critical Clearing Time Menggunakan Persamaan Simultan Berbasis Trajektori Kritis Tanpa Kontrol yang Terhubung Dengan Infinite Bus*. Surabaya: Proceeding Seminar Tugas Akhir Elektro (TIS), (2014) 1-6
- [12] C. Chapra, Steven and Raymond P. Canale. 2007. *Metode Numerik untuk Teknik*. Jakarta: Universitas Indonesia (UI-Press)
- [13] Diby Laksono, Heru. 2008. *Studi Kestabilan Transient Sistem Tenaga Listrik Multimesin (Model IEEE 9 Bus 3 Mesin)*. Padang: No. 30 Vol.1 Thn. XV November 2008 ISSN: 0854-8471
- [14] Baakanyang M, Bessie. 2010. *Optimal Approach Towards Using Phasor Measurement (PMU) Data in Equal Area Criterion Based systems for Power System Transient Stability Assessment*. Jepang: PhD Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Engineering, Kyushu Institute of Technology.
- [15] Despa, Dikpride. 2010. *Application of Phasor Measurement Unit (PMU) Data for Out Of Step Detection*. Jepang: International Conference on Electrical Engineering.

- [16] Diby Laksono, Heru. 2012. *Studi Stabilitas Peralihan Multimesin pada Sistem Tenaga Listrik dengan Metode Euler (Studi Kasus : PT. PLN P3B Sumatera)*. Padang: Vol. 19 No.2 Oktober 2012 ISSN: 0854-8471
- [17] Atmaja, Surya. 2012. *Perhitungan Critical Clearing Time dengan Menggunakan Metode Time Domain Simulation*. Surabaya: Proseding Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro FTI-ITS, Juni 2012
- [18] Mishra, Kiran and S. V Umredkar. 2013. *Transient Stability Analysis of Multi Machine System*. India : International Journal of Science and Research (IJSR), India Online ISSN: 2319-7064