



TUGAS AKHIR - TE 091399

**MENGHITUNG *CCT* SECARA LANGSUNG DENGAN
MENGUNAKAN MODIFIKASI METODE HILANGNYA
SINKRONISASI PADA SISTEM YANG TERHUBUNG KE
BUS *INFINITE***

Aldhimas Satria Aditama
NRP 2210100063

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

2014



TUGAS AKHIR - TE 091399

**DIRECT METHOD FOR COMPUTATING CRITICAL CLEARING
TIME (CCT) USING MODIFIED OF LOSING SYNCHRONISM
FOR SYSTEM CONNECTED TO INFINITE BUS**

Aldhimas Satria Aditama
NRP 2210100063

Advisor
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2014

**MENGHITUNG CCT SECARA LANGSUNG DENGAN
MENGUNAKAN MODIFIKASI METODE HILANGNYA
SINKRONISASI PADA SISTEM YANG TERHUBUNG KE BUS
INFINITE**

Nama : Aldhimas Satria Aditama
Pembimbing I : Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Pembimbing II : Feby Agung Pamuji, ST, MT

ABSTRAK

Analisis mengenai kestabilan transien sistem tenaga memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin keamanan dan keberlangsungan operasional suatu sistem tenaga listrik. Pada saat terjadi gangguan, rele pengaman akan bekerja untuk membuka *circuit breakers* dalam waktu sekitar 200-300 ms. Akan tetapi hal ini tidak menjamin sistem akan kembali pada kondisi *steady-state*. Hal ini disebabkan adanya waktu pemutus kritis / *critical clearing time (CCT)* pada sistem tenaga listrik. *CCT* adalah perhitungan batas waktu kritis setelah terjadi gangguan dimana saat terjadi gangguan harus diputus sebelum *CCT* agar sistem dapat kembali stabil. Apabila gangguan diputus sebelum *CCT* maka sistem dapat kembali stabil. Namun apabila gangguan diputus lebih dari *CCT* maka sistem tidak dapat kembali stabil. Dengan metode *numerical simulation method* nilai *CCT* yang didapatkan hanya berupa nilai batas stabil dan batas tidak stabil sistem tenaga listrik. Dalam tugas akhir ini akan dihitung nilai *CCT* pada banyak mesin menggunakan modifikasi metode hilangnya sinkronisasi pada sistem yang terhubung ke bus *infinite*. Rata-rata waktu untuk menghitung *CCT* pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping* adalah 1,4446 detik, *numerical simulation method* adalah 318,977 detik. Pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping* adalah 1,4826 detik, *numerical simulation method* adalah 311,998 detik. Pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping* adalah 2,7272 detik, *numerical simulation method* adalah 328,827 detik. Pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping* adalah 3,6714 detik, *numerical simulation method* adalah 331,484 detik.

Kata Kunci : Analisis Kestabilan Transien, *Critical Clearing Time (CCT)*, *Critical Trajectory*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DIRECT METHOD FOR COMPUTATING CRITICAL CLEARING TIME (CCT) USING MODIFIED OF LOSING SYNCHRONISM FOR SYSTEM CONNECTED TO INFINITE BUS

Name : Aldhimas Satria Aditama
Advisor I : Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Advisor II : Feby Agung Pamuji, ST, MT

ABSTRACT

Analysis of transient stability of power systems hold a very important role in guaranteeing the security and sustainability of the operations of electric power system. In the event of disturbance, protection relay will work to open the circuit breakers in about 200-300 ms. Unfortunately, this does not guarantee the system will return to steady-state conditions. This is due to the existence of critical clearing time (CCT) on the electricity system. CCT is the calculation of critical time for system to clear disturbance after its occurrence. Disturbance should be clearance before the CCT for the system to stabilize. When disturbance was cleared before the CCT, the system can be stabilized. But when disturbance was cleared more than CCT then the system can not be stabilized. With numerical simulation method of the CCT method recovered only be the limit of stable and unstable limit electricity system. In this final project will count the CCT on many machines using a modification of the method loss of synchronization on system connected to infinite bus. The average time to calculate the CCT in the system 2-generator 9 bus connected to an infinite bus without damping is 1.4446 seconds, numerical simulation method is 318.977 seconds. At 2 generator-9 system bus connected to an infinite bus with damping is 1.4826 seconds, numerical simulation method is 311.998 seconds. In the 5-generator system bus 30 connected to an infinite bus without damping is 2.7272 seconds, numerical simulation method is 328.827 seconds. In the 5-generator system bus 30 connected to an infinite bus with damping is 3.6714 seconds, numerical simulation method is 331.484 seconds.

Keywords : Transient Stability Analysist, *Critical Clearing Time (CCT)*, *Critical Trajectory*

Halaman ini sengaja dikosongkan

**MENGHITUNG CCT SECARA LANGSUNG DENGAN
MENGUNAKAN MODIFIKASI METODE HILANGNYA
SINKRONISASI PADA SISTEM YANG TERHUBUNG KE BUS
INFINITE**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

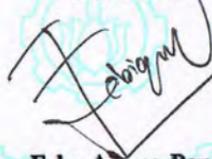
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,



Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng
NIP. 19730927199031004

Dosen Pembimbing II,



Feby Agung Pamuji, ST., MT.
NIP. 198702062012121002



KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya yang berlimpah, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul: **Menghitung CCT Secara Langsung Dengan Menggunakan Modifikasi Metode Hilangnya Sinkronisasi pada Sistem yang Terhubung ke Bus *Infinite*** tepat pada waktunya. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan studi pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan Tugas Akhir ini, saya sebagai penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. ALLAH SWT atas segala rahmat dan nikmat yang tidak terhitung.
2. Segenap keluarga, terutama pada kedua orang tua saya. Ir. Supriyadi dan Luthfi Noer Cholida serta saudara saya Devina Sarah Astari yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa kepada penulis. Tak lupa kepada kedua kakek-nenek penulis, H. Dasuki dan Hj. Siti Maryam yang tidak henti memberikan saya pelajaran tentang kehidupan dan doa yang tidak henti kepada penulis.
3. Bapak Dr.Eng. Ardyono Priyadi ST, M.Eng. dan Feby Agung Pamuji, ST., MT.sebagai Dosen Pembimbing Penulis yang telah membimbing,memberikan pengetahuan, arahan, dan bantuan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Teman-teman asisten LIPIST B204 seperjuangan Revan, Isa, Nadir, Aryo, Chafid, Royyan, Tumpi, Wildan, Lala, Defin,. Terima kasih atas *support* dari Esi, Ruli, Evandro, Galuh, Elyza. Terima kasih atas bimbingan dari Pak Ony dan Pak Wahyu. Serta mas Billy, mas Hakim, mas Adi atas segala bantuannya.
5. Keluarga E-50 atas dukungan dan semangat yang tidak henti kepada Penulis.
6. Seluruh GAP KERAH terutama Dimas Airlangga, Ahmad Haris Kurnia Dwi Putra dan Wildan Rahadian yang memberikan keceriaan dan membantu Penulis dalam banyak hal
7. Seluruh teman-teman AIESEC Surabaya terutama dari TM Department, Keke, Alfian, dan Hera.

8. Nilna Rizqiyah yang selalu memberi semangat kepada Penulis untuk menyelesaikan studi.
9. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan Tugas Akhir yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu hingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.

Besar harapan penulis agar Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukkan bagi pembaca. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik. Penulis juga memohon maaf jika ada kekurangan pada Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan di kemudian hari.

Surabaya, Juni 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	2
1.4. Metodologi	2
1.5. Sistematika Penulisan.....	5
1.6. Relevansi.....	5
BAB 2 KESTABILAN TRANSIEN	
2.1 Pengertian Kestabilan.....	7
2.2 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	8
2.2.1 Kestabilan Sudut Rotor	8
2.2.2. Kestabilan Frekuensi	9
2.2.3. Kestabilan Tegangan	9
2.3 Persamaan Ayunan	11
2.4 Lintasan Kritis (<i>Critical Trajectory</i>)	14
2.5 <i>Critical Clearing Time (CCT)</i>	15
2.6 <i>Damper Winding</i>	16
BAB 3 PEMODELAN SISTEM	
3.1. <i>Power Flow</i>	19
3.2. Reduksi Matrik	24
3.3. Pemodelan Sistem	25
3.4. Perumusan Masalah.....	27

3.4.1. Metode Runge-kutta Orde 4.....	28
3.4.2. Modifikasi Persamaan Trapezoidal.....	29
3.4.3. Matriks Jacobian	31
3.4.4. Metode Newton Raphson.....	32
3.5. Kondisi Kritis Saat Hilangnya Sinkronisasi.....	33
3.6. Perumusan Minimalisasi	34
3.7. Perhitungan <i>Critical Clearing Time</i>	35

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

4.1. Perhitungan <i>Critical Clearing Time (CCT)</i> pada Sistem IEEE 2 Generator-9 Bus Terhubung Bus <i>Infinite</i>	39
4.1.1 Penentuan Parameter Awal untuk Sistem IEEE 2 Generator 9 Bus Terhubung Bus <i>Infinite</i>	41
4.1.1.1. Perhitungan <i>CCT</i> pada Sistem IEEE 2 Generator 9 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i>	43
4.1.1.2. <i>CCT</i> pada Sistem IEEE 2 Generator-9 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i> tanpa <i>Damping</i>	43
4.1.1.3. Analisis Grafik Karakteristik Sistem IEEE 2 generator-9 bus yang Terhubung ke Bus <i>Infinite</i> tanpa <i>Damping</i>	45
4.1.2. <i>CCT</i> pada Sistem IEEE 2 Generator-9 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i> dengan <i>Damping</i>	64
4.1.2.1. Analisis Grafik Karakteristik Sistem 2 Generator 9 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i> dengan <i>Damping</i>	66
4.2. Perhitungan <i>CCT</i> pada Sistem IEEE 5 Generator 30 Bus Terhubung Bus <i>Infinite</i>	85
4.2.1. Penentuan Parameter Awal untuk Sistem IEEE 5 Generator 30 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i>	89
4.2.1.1. Perhitungan <i>CCT</i> pada Sistem IEEE 5 Generator 30 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i>	91

4.2.1.2. CCT pada Sistem IEEE 5 Generator 30 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i> tanpa <i>Damping</i>	91
4.2.1.3. Analisis Grafik Karakteristik Sistem IEEE 5 Generator 30 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i> tanpa <i>Damping</i>	93
4.2.2. CCT pada Sistem IEEE 6 Generator-30 Bus yang Terhubung Bus <i>Infinite</i> dengan <i>Damping</i>	115
4.2.2.1. Analisis Grafik Karakteristik Sistem IEEE 5 Generator 30 Bus yang Terhubung ke Bus <i>Infinite</i> dengan <i>Damping</i>	117
 BAB 5 PENUTUP	
5.1. Kesimpulan.....	141
5.2. Saran.....	142
 DAFTAR PUSTAKA	
RIWAYAT HIDUP PENULIS	145

Halaman ini sengaja dikosongkan

TABLE OF CONTENTS

	Page
TITLE	
STATEMENT OF AUTHENCITY	
STATEMENT OF APPROVAL	
ABSTRACT	i
PREFACE.....	v
TABLE OF CONTENTS	vii
LIST OF FIGURE	xi
LIST OF TABLES.....	xxi
CHAPTER 1 INTODUCTION	
1.1. Background	1
1.2. Problem Formulation	2
1.3. Objective	2
1.4. Methodology	2
1.5. Writing Systematics	5
1.6. Relevance	5
CHAPTER 2 TRANSIENT STABILITY	
2.1 Definition of Stability	7
2.2 Stability of Electric Power Systems	8
2.2.1 Rotor Angle Stability	8
2.2.2.Frequency Stability	9
2.2.3.Voltage Stability.....	9
2.3 Swing Equation	11
2.4 Critical Trajectory	14
2.5 <i>Critical Clearing Time (CCT)</i>	15
2.6 <i>Damper Winding</i>	16
CHAPTER 3 SYSTEM MODELING	
3.1. <i>Power Flow</i>	19
3.2. Matrix Reduction.....	24
3.3. System Modeling.....	25
3.4. Problem Formulation.....	27

3.4.1. 4 th Order Runge-kutta Method	28
3.4.2. Modified Trapezoida Equation.....	29
3.4.3. Jacobian Matrix	31
3.4.4. Newton Raphson Method	32
3.5. Critical Condition of Loss of Synchronization.....	33
3.6. Minimization Formulation	34
3.7. Calculation of Critical Clearing Time	35

CHAPTER 4 SIMULATION AND ANALYSIS

4.1. Calculation of Critical Clearing Time (CCT) on the System IEEE 2 Generators-9 Bus Connected to Infinite Bus.....	39
4.1.1. Determination of Initial Parameter of System IEEE 2 Generators 9 Bus Connected to Infinite Bus.....	41
4.1.1.1. Calculation of CCT on the System IEEE 2 Generators 9 Bus Connected to Infinite Bus.....	43
4.1.1.2. CCT on the System IEEE 2 Generators 9 Bus Connected to Infinite Bus Without Damping ..	43
4.1.1.3. Figure Analysis of the Characteristics of System IEEE 2 Generators 9 Bus Connected to Infinite Bus Without Damping .	45
4.1.2. CCT on the System IEEE 2 Generators 9 Bus Connected to Infinite Bus With Damping	64
4.1.2.1. Figure Analysis of the Characteristics of System IEEE 2 Generators 9 Bus Connected to Infinite Bus With Damping	66
4.2. Calculation of Critical Clearing Time (CCT) on the System IEEE 5 Generators 30 Bus Connected to Infinite	85
4.2.1. Determination of Initial Parameter of System IEEE 5 Generators 30 Bus Connected to Infinite Bus.....	89
4.2.1.1. Calculation of CCT on the System IEEE 5 Generators 30 Bus Connected to Infinite Bus.....	91

4.2.1.2	<i>CCT</i> on the System IEEE 5 Generators 30 Bus Connected to Infinite Bus Without Damping ...	91
4.3.1.1.	Figure Analysis of the Characteristics of System IEEE 5 Generators 30 Bus Connected to Infinite Bus Without Damping	93
4.2.2.	<i>CCT</i> on the System IEEE 5 Generators 30 Bus Connected to Infinite Bus With Damping	115
4.3.1.2.	Figure Analysis of the Characteristics of System IEEE 5 Generators 30 Bus Connected With Damping	117
 CHAPTER 5 CONCLUSION		
5.1.	Conclusion	141
5.2.	Sugestion	142
REFERENCES		143
CURRICULUM VITAE		145

This page intentionally left blank

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1. Data parameter saluran transmisi sistem IEEE 3 generator-9 bus.	41
Tabel 4.2. Data bus sistem IEEE 3 generator-9 bus.	41
Tabel 4.3. Parameter yang diperlukan dari hasil iterasi aliran daya untuk sistem IEEE 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i>	42
Tabel 4.4. Nilai Pe untuk tiap gangguan pada sistem IEEE 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	42
Tabel 4.5. Nilai Pe untuk tiap gangguan pada sistem IEEE 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	43
Tabel 4.6. Perbandingan nilai <i>CCT</i> yang hasil perhitungan metode yang diusulkan dengan nilai <i>CCT</i> hasil perhitungan <i>numerical simulation method</i> pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	44
Tabel 4.7. Perbandingan nilai <i>CCT</i> yang hasil perhitungan metode yang diusulkan dengan nilai <i>CCT</i> hasil perhitungan <i>numerical simulation method</i> pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	64
Tabel 4.8. Data parameter saluran transmisi sistem IEEE 6 generator-30 bus.	86
Tabel 4.9. Data bus sistem IEEE 6 generator-30 bus.	41
Tabel 4.10. Parameter yang diperlukan dari hasil iterasi aliran daya untuk sistem IEEE 5 generator-30 bus yang terhubung bus <i>infinite</i>	89
Tabel 4.11. Nilai Pe untuk tiap gangguan pada sistem IEEE 5 generator-30 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	90
Tabel 4.12. Nilai Pe untuk tiap gangguan pada sistem IEEE 5 generator-30 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	90

Tabel 4.13. Perbandingan nilai <i>CCT</i> yang hasil perhitungan metode yang diusulkan dengan nilai <i>CCT</i> hasil perhitungan <i>numerical simulation method</i> pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	91
Tabel 4.14. Perbandingan nilai <i>CCT</i> yang hasil perhitungan metode yang diusulkan dengan nilai <i>CCT</i> hasil perhitungan <i>numerical simulation method</i> pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	116

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1. Metodologi tugas akhir	4
2.1. Klasifikasi kestabilan sistem tenaga	8
2.2. Respon sudut rotor terhadap gangguan transien	11
2.3. Rotor generator yang membandingkan arah perputaran serta momen putar mekanis dan listrik	11
2.4. Lintasan kritis satu generator terhubung ke bus <i>infinite</i> dengan peredam (<i>damping</i>)	15
2.5. Konstruksi generator sinkron	16
2.6. <i>Damper winding</i> yang terpasang pada rotor generator sinkron dengan 4-pole	17
3.1. Ilustrasi metode Newton Raphson	18
3.2. Pemodelan Generator	24
3.3. Konsep dari modifikasi metode trapezoidal	28
3.4. Konfigurasi dan dimensi matrik Jacobian	29
3.5. Susunan matriks Jacobian untuk perhitungan <i>CCT</i> menggunakan modifikasi metode hilangnya sinkronisasi	36
4.1. <i>Single line diagram</i> sistem IEEE 2 generator 9-bus yang terhubung bus <i>infinite</i>	40
4.2. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan A pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	46
4.3. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	47
4.4. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan B pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	48
4.5. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	49
4.6. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan C pada	

sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	50
4.7. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 3 generator 9-bus tanpa <i>damping</i>	51
4.8. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan D pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	52
4.9. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	53
4.10. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan E pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	54
4.11. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 3 generator 9-bus tanpa <i>damping</i>	55
4.12. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan F pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	56
4.13. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 3 generator 9-bus tanpa <i>damping</i>	57
4.14. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan G pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	58
4.15. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	59
4.16. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan H pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	60

4.17.(a) Grafik karakteristik sudut (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 3 generator 9-bus tanpa <i>damping</i>	61
4.18 Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan I pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	62
4.19.(a) Grafik karakteristik sudut (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 3 generator 9-bus tanpa <i>damping</i>	63
4.20.Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan A pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	67
4.21.(a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	68
4.22.Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan B pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	69
4.23.(a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	70
4.24.Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan C pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	71
4.25.(a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	72
4.26.Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan D pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	73

4.27.(a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	74
4.28. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan E pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	75
4.29.(a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	76
4.30. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan F pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	77
4.31.(a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	78
4.32. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan G pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	79
4.33.(a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	80
4.34. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan H pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	81
4.35.(a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s)	
(b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i> .	82
4.36. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan I pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i>	

dengan <i>damping</i>	83
4.37. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	84
4.38. <i>Single line diagram</i> sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i>	85
4.39. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan A pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	94
4.40. (a) Grafik karakteristik sudut (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	95
4.41. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan B pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	96
4.42. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	97
4.43. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan C pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	98
4.44. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	99
4.45. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan D pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	100
4.46. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik	

gangguan D pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	101
4.47. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan E pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	102
4.48. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	103
4.49. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan F pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	104
4.50. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	105
4.51. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan G pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	106
4.52. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	107
4.53. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan H pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	108
4.54. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	109
4.55. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan I pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	110

4.56. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	111
4.57. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan J pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	112
4.58. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan J pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	113
4.59. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan K pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	114
4.60. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan K pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> tanpa <i>damping</i>	115
4.61. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan A pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	119
4.62. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	120
4.63. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan B pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	121
4.64. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	122
4.65. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan C pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i>	

dengan <i>damping</i>	123
4.66. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	124
4.67. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan D pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	125
4.68. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	126
4.69. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan E pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	127
4.70. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	128
4.71. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan F pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	129
4.72. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	130
4.73. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan G pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	131
4.74. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	132
4.75. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan H pada	

sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	133
4.76. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	134
4.77. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan I pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	135
4.78. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	136
4.79. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan J pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	137
4.80. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan J pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	138
4.81. Grafik karakteristik kecepatan sudut atau ω (rad/s) terhadap sudut rotor atau δ (rad) di titik gangguan K pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	139
4.82. (a) Grafik karakteristik sudut rotor (δ) terhadap waktu (s) (b) kecepatan sudut (ω) terhadap waktu (s) di titik gangguan K pada sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus <i>infinite</i> dengan <i>damping</i>	140

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Analisis mengenai kestabilan transien sistem tenaga memegang peranan yang sangat penting dalam menjamin keamanan dan keberlangsungan operasional suatu sistem tenaga listrik. Kestabilan transien sistem tenaga adalah kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik untuk kembali ke kondisi operasi yang stabil setelah sistem tersebut mengalami gangguan. Terdapat dua tipe akibat dari gangguan pada sistem tenaga, yaitu *transient* dan *steady state*. Pada *transient* gangguan yang terjadi lebih besar seperti hubung singkat, pemindahan beban atau lepasnya generator secara tiba-tiba.

Pada saat terjadi gangguan, rele pengaman akan bekerja untuk membuka *circuit breakers* dalam waktu kurang dari 200-300 ms. Akan tetapi hal ini tidak menjamin sistem akan kembali pada kondisi *steady-state*. Hal ini disebabkan adanya waktu pemutus kritis / *critical clearing time (CCT)* pada sistem tenaga listrik. *CCT* adalah perhitungan batas waktu kritis setelah terjadi gangguan dimana saat terjadi gangguan harus diputus sebelum *CCT* agar sistem dapat kembali stabil. Apabila *circuit breaker* terbuka dan gangguan diputus sebelum *CCT* maka sistem dapat kembali stabil. Namun apabila *circuit breaker* dan gangguan diputus lebih dari *CCT* maka sistem tidak dapat kembali stabil.

Metode yang sebelumnya digunakan untuk perhitungan *CCT* adalah metode *numerical simulation*. Metode ini melakukan perhitungan berdasarkan pada permasalahan nilai awal (*initial value*). Namun metode ini tidak secara langsung mendapatkan nilai *CCT* suatu sistem, dimana *CCT* yang ditemukan masih dalam jarak waktu antara stabil dan tidak stabil dari sistem setelah mendapatkan gangguan. Selain itu dengan integrasi numerikal yang begitu panjang dalam proses perhitungan *CCT* menyebabkan metode ini memerlukan waktu yang tidak sedikit dalam proses iterasinya. Dengan pola perubahan yang terjadi secara cepat akibat gangguan-gangguan yang muncul pada sistem, metode ini sangat tidak efektif jika diterapkan pada analisis kestabilan transien.

Berbeda dengan metode simulasi konvensional, formulasi metode ini berdasarkan pada batas nilai permasalahan agar secara langsung mendapatkan nilai pasti dari *CCT*. Metode ini berdasarkan pada

perhitungan *critical trajectory*, dimana *trajectory* tersebut dimulai pada saat terjadi gangguan hingga mencapai kondisi titik akhir yang disebut *Unstable Equilibrium Point* . Sehingga *critical trajectory* dan *CCT* dapat dihitung secara bersamaan.

Metode yang telah ada hingga sekarang dalam mendapatkan *critical trajectory* adalah dengan mendefinisikan kondisi titik akhir dari *trajectory* tersebut, yaitu pada titik kritis karena hilangnya sinkronisasi. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan perhitungan dengan modifikasi metode hilangnya sinkronisasi pada sistem yang terhubung bus *infinite*, serta membandingkan hasil perhitungan *CCT* dan lamanya perhitungan dengan metode perhitungan *CCT* lain.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan utama dalam tugas akhir ini adalah mendapatkan *critical clearing time (CCT)* dengan menggunakan modifikasi dari metode hilangnya sinkronisasi pada sistem *multi-machine* 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite* dan 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite*

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah menentukan waktu pemutusan kritis/*critical clearing time (CCT)* dengan modifikasi dari metode hilangnya sinkronisasi pada sistem yang terhubung dengan bus *infinite* untuk kemudian hasil perhitungan *CCT* dan lama perhitungan dari metode ini dapat dibandingkan dengan metode perhitungan lain. Sehingga metode ini dapat dijadikan referensi dalam perhitungan *critical clearing time (CCT)*.

1.4 Metodologi

1. Studi literatur

Penulis melakukan studi literatur melalui buku, jurnal ilmiah (*paper*) dan artikel-artikel dari internet yang berhubungan dengan stabilitas transient, sistem *multi-machine* yang terhubung dengan *infinite bus*.

2. Perhitungan *CCT*

Melakukan perhitungan terhadap formulasi yang telah diketahui untuk menunjang pemodelan sistem dan simulasi. Data yang

dikumpulkan adalah data dari generator, transmisi, dan bus dari sistem. Kemudian dari data perhitungan tersebut dibuatlah struktur logika berupa diagram alir untuk proses pembuatan program.

3. Pemodelan Sistem dan Simulasi

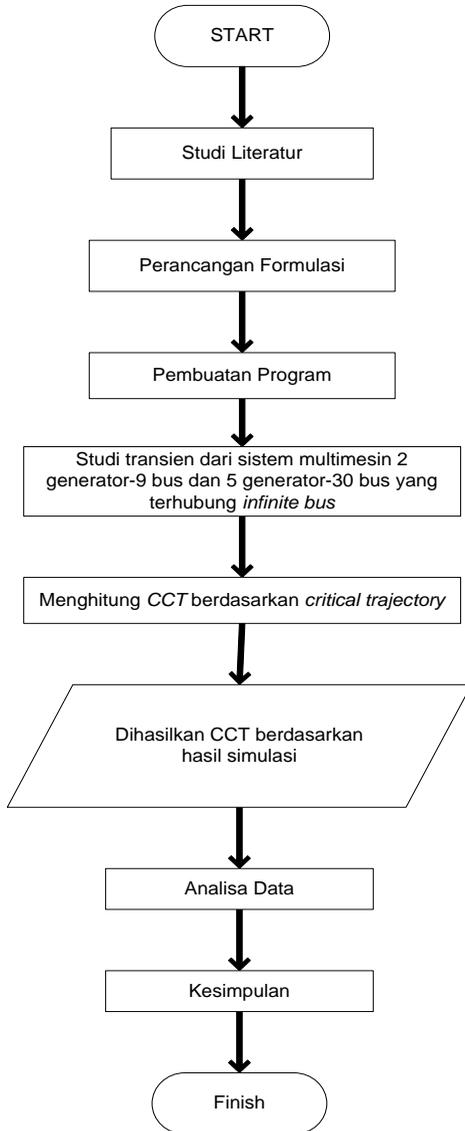
Melakukan studi transien pada sistem *multi-machine* 3 generator 9 bus saat terjadi gangguan untuk kemudian dibuat pemodelan dari simulasinya. *Critical clearing time (CCT)* dihitung berdasarkan hilangnya sinkronisasi dari sistem *multi machine* tersebut.

4. Analisa Data

Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan suatu hasil yang akan dianalisis. Data yang akan dianalisis adalah parameter-parameter *CCT (critical clearing time)* pada stabilitas transien, sehingga didapatkan permodelan yang paling baik.

5. Kesimpulan

Kesimpulan didapatkan dari analisis permasalahan dan hasil simulasi. Selain itu, juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.



Gambar 1.1. Metodologi tugas akhir

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini terbagi atas lima bagian dan masing-masing bab akan terurai sebagai berikut:

Bab I :Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, metodologi dan sistematika penulisan.

Bab II :Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Bab ini membahas tentang teori-teori mengenai permodelan sistem, analisis aliran daya, trajektori kritis dan mengenai CCT beserta hubungannya dengan kestabilan sistem tenaga.

Bab III :Permodelan Sistem

Pada bab ini dibahas mengenai pemodelan sistem, dan persamaan-persamaan yang digunakan dalam permodelan sistem.

Bab IV :Simulasi dan Analisis

Bab ini membahas tentang hasil simulasi, analisis dari hasil simulasi. Data yang akan dianalisis adalah parameter-parameter CCT pada analisis kestabilan transien, sehingga didapatkan permodelan yang paling baik.

Bab V :Penutup

Kesimpulan tersebut merupakan jawaban dari permasalahan yang dianalisis. Selain itu, juga akan diberikan saran sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan.

1.6 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat menjadi metode perhitungan *critical clearing time (cct)* yang lebih cepat dan akurat sehingga mampu memberi gambaran mengenai kestabilan sistem tenaga listrik akibat gejala transien yang terjadi secara

tiba-tiba. Selain itu, metode ini juga dapat digunakan sebagai referensi dalam penelitian perhitungan *Critical Clearing Time (CCT)* selanjutnya.

BAB 2

KESTABILAN TRANSIEN

2.1. Pengertian Kestabilan

Kestabilan sistem tenaga listrik adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk tetap kembali beroperasi di titik keseimbangan saat dan setelah terjadi gangguan sehingga operasi dari sistem tersebut tetap terjamin. Definisi ini berlaku untuk sistem interkoneksi dengan generator tertentu atau grup generator. Sistem tenaga listrik adalah sistem nonlinier yang beroperasi dalam kondisi yang berubah-ubah setiap detiknya. Variasi beban dinamis yang dinamis dan pasokan daya dari generator setiap detik akan berubah-ubah. Sistem harus mampu menyesuaikan pasokan daya generator dan kebutuhan daya beban untuk menjamin keberlangsungan operasi. Sistem juga harus mampu bertahan dari berbagai macam gangguan seperti short circuit pada jaringan transmisi atau rugi-rugi dari generator besar. Apabila sistem mengalami gangguan besar maka dapat menyebabkan perubahan struktural karena adanya pemutusan pada bagian yang terkena gangguan. Gangguan besar dapat membuat generator kehilangan kestabilannya. Maka dari itu diperlukan analisis kestabilan agar generator dapat kembali stabil setelah terjadinya gangguan.

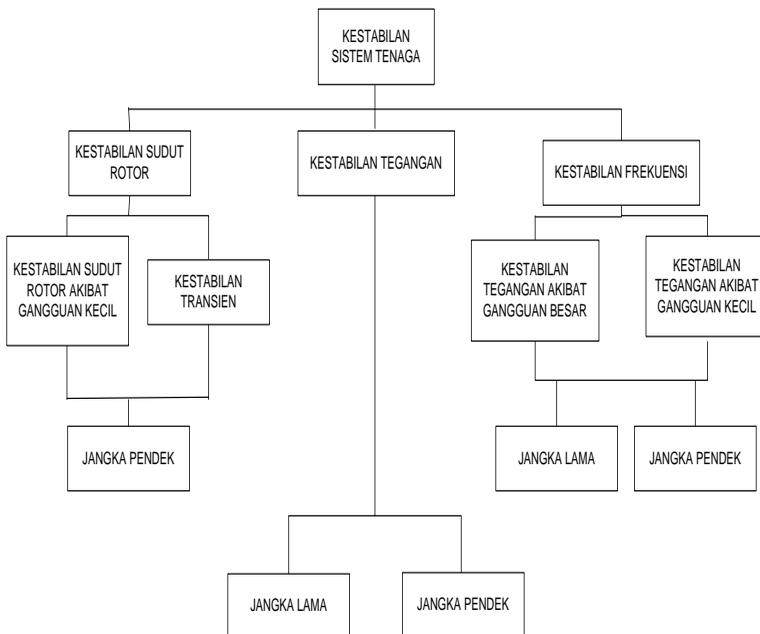
Kriteria utama stabilitas adalah bagaimana mesin-mesin mampu mempertahankan sinkronisasi pada akhir periode transien. Pada kondisi operasi normal, terdapat keseimbangan antara daya input mekanis dari *prime mover* dengan daya *output* listrik generator. Dalam kondisi ini generator berputar pada kecepatan sinkron, namun saat terjadi gangguan pada sistem, maka sesaat akan terjadi perbedaan antara daya *output* listrik dengan daya *input* mekanis, jika gangguan yang terjadi menyebabkan daya *output* listrik melebihi dari daya *input* mekanis, maka generator akan mengalami perlambatan pada putaran rotor begitu juga sebaliknya. Perlambatan atau percepatan pada generator akan mengakibatkan pergeseran dari sudut rotor sehingga generator tidak lagi sinkron. Besar pergeseran sudut rotor bergantung pada besarnya gangguan yang terjadi. Apabila sistem mampu meredam respon osilasi yang mengikuti gangguan maka sistem mempunyai kekuatan dalam mengurangi osilasi.

2.2. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik [1]

Untuk mempermudah dalam menganalisa kestabilan, perlu sebuah pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga listrik. Berdasarkan referensi [1] kestabilan sistem tenaga listrik dikategorikan menjadi tiga, yaitu:

1. Kestabilan sudut rotor
2. Kestabilan frekuensi
3. Kestabilan tegangan

Oleh karena itu, pada gambar 2.1 ditunjukkan pengklasifikasian kestabilan sistem tenaga listrik untuk mempermudah dalam menganalisa kestabilan.



Gambar 2.1. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

2.2.1. Kestabilan Sudut Rotor [1]

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan dari generator sinkron yang saling terinterkoneksi pada sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasinya setelah terjadi gangguan. Dalam hal

ini tergantung kemampuan mempertahankan keseimbangan antar torsi mekanik dan torsi elektrik pada generator tersebut.

Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi 2 kategori, yaitu[1]:

1. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil yaitu kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya akibat gangguan kecil seperti perubahan beban. Studi kestabilan ini mempunyai kurun waktu 10-20 detik setelah gangguan.
2. Kestabilan transien atau kestabilan sudut rotor gangguan besar yaitu kestabilan transien berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan besar, seperti hubung singkat pada saluran transmisi. Respon sistem yang dihasilkan melibatkan besarnya penyimpangan dari sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh ketidaklinieran hubungan sudut daya. Studi stabilitas transien memiliki kurun waktu 3-5 detik setelah gangguan. Untuk sistem yang sangat besar dengan ayunan antar wilayah yang dominan maka kurun waktu dapat diperpanjang menjadi 10-20 detik.

Kestabilan sudut rotor kecil dan kestabilan transien dikategorikan sebagai fenomena jangka pendek.

2.2.2. Kestabilan Frekuensi[1]

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan dari sistem tenaga untuk menjaga frekuensi agar tetap stabil setelah mengalami gangguan yang dapat mengakibatkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan beban. Masalah kestabilan frekuensi berhubungan dengan ketidakmampuan respon peralatan, koordinasi peralatan kontrol dan proteksi yang lemah, atau cadangan daya generator yang tidak mencukupi. Kestabilan frekuensi dapat menjadi fenomena jangka pendek atau fenomena jangka panjang.

2.2.3. Kestabilan Tegangan [1]

Kestabilan ini mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk menyeimbangkan tegangan pada seluruh bus di dalam sistem

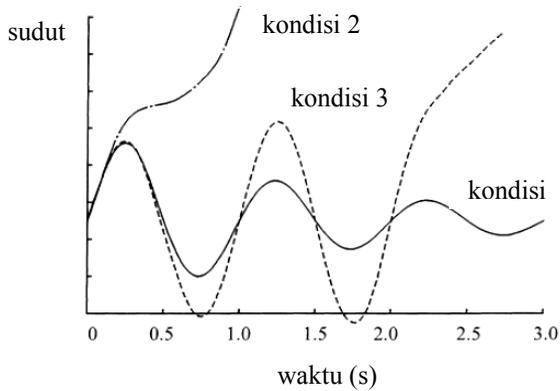
sesaat setelah terjadi gangguan. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan kesetimbangan antara *supply* daya dan kebutuhan daya beban. Ketidakstabilan yang terjadi bisa dalam bentuk penurunan atau meningkatnya tegangan pada beberapa bus. Akibat yang mungkin terjadi karena ketidakstabilan tegangan adalah kehilangan beban pada suatu area atau putusnya jaringan transmisi oleh relay proteksi. Faktor utama yang berkontribusi ketidakstabilan tegangan adalah ketika gangguan yang terjadi menyebabkan kebutuhan daya reaktif meningkat diluar dari kapasitas daya reaktif yang tersedia oleh pembangkit.

Kestabilan tegangan diklasifikasikan menjadi 2 yaitu [1] :

1. Kestabilan tegangan akibat gangguan besar adalah kemampuan dari sistem untuk menjaga tegangan *steady* setelah mengalami gangguan besar seperti hilangnya pembangkitan. Studi stabilitas tegangan diperpanjang dari beberapa detik hingga puluhan menit.
2. Kestabilan tegangan akibat gangguan kecil adalah kemampuan sistem tenaga untuk menjaga tegangan *steady* ketika mengalami gangguan kecil seperti kenaikan kebutuhan daya pada beban.

Kestabilan tegangan dapat menjadi fenomena jangka pendek atau fenomena jangka panjang.

Pada gambar 2.2 menunjukkan suatu kondisi pada generator sinkron. Pada kondisi 1 menunjukkan kondisi stabil, sudut rotor bertambah hingga maksimum, kemudian mengalami osilasi hingga mencapai kondisi *steady-state*. Kondisi 2 menunjukkan kondisi *first swing instability*, sudut rotor terus bertambah hingga generator kehilangan sinkronisasinya. Sedangkan pada kondisi 3 menunjukkan kondisi *multi swing instability*, osilasi yang semakin bertambah mengakibatkan generator menjadi lepas sinkron .

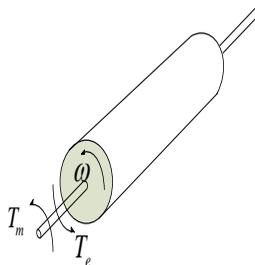


Gambar 2.2. Respon Sudut Rotor Terhadap Gangguan Transien [3]

2.3. Persamaan Ayunan

Kestabilan transien (*Transient Stability*) berkaitan dengan keseimbangan antara torsi mekanik dengan torsi elektrik pada setiap mesin sinkron yang terdapat pada sistem tenaga listrik . Jika terjadi gangguan, maka akan terjadi ketidakseimbangan antara torsi mekanik dengan torsi elektrik sehingga menyebabkan percepatan atau perlambatan pada putaran rotor generator.

Pengaturan gerak rotor suatu mesin sinkron berdasarkan pada prinsip dasar dinamika dimana momen percepatan adalah hasil kali momen inersia rotor dan percepatan sudut [2]. Pada gambar 2.3 diilustrasikan suatu rotor generator dengan membandingkan arah putaran serta momen putar mekanis dan elektrik.



Gambar 2.3. . Rotor Generator yang Membandingkan Arah Perputaran Serta Momen Putar Mekanis dan Elektrik.

Kestabilan transien tergantung pada kondisi awal dan besarnya gangguan. Pada kondisi stabil, besarnya torsi mekanik sama dengan torsi elektrik yang menyebabkan tidak adanya percepatan maupun perlambatan pada rotor. Namun pada saat gangguan timbul ketidakseimbangan antara torsi mekanis dan torsi elektrik atau torsi listrik, maka akan menghasilkan nilai torsi yang menyebabkan percepatan atau perlambatan pada rotor, seperti pada persamaan berikut :

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.1)$$

Dimana :

T_a = Torsi percepatan/perlambatan, dalam satuan N-m

T_m = Torsi mekanik, dalam satuan N-m

T_e = Torsi elektromagnetik, dalam satuan N-m

Inersia gabungan generator dan penggerak utama (*prime mover*) dipercepat oleh ketidak seimbangan torsi, sehingga persamaan (2.1) menjadi:

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.2)$$

Keterangan :

J :Momen kelembaman total dari massa rotor dalam satuan $kg \cdot m^2$

θ_m :Pergeseran sudut dari rotor terhadap suatu sumbu yang diam (*stationary*), dalam satuan radian mekanis

t :Waktu dalam detik(*second*)

T_a :Momen putar percepatan bersih, dalam satuan Nm

T_m :Momen putar mekanis atau poros (penggerak) yang diberikan oleh penggerak mula dikurangi dengan momen putar perlambatan (*retarding*) yang disebabkan oleh rugi-rugi perputaran, dalam satuan Nm

T_e :Momen putar elektrik atau elektromagnetis bersih, dalam Nm

Persamaan diatas dapat dinormalisasikan ke dalam konstanta inersia per unit H yang didefinisikan sebagai energi kinetik dalam satuan watt-second. ω_{0m} sebagai kecepatan sudut pada kondisi sinkron dalam mekanikal radian per detik, konstanta inersia yaitu:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J\omega_{0m}^2}{VA_{base}} \quad (2.3)$$

Dari persamaan konstanta inersia H di atas, didapatkan momen inersia J yaitu:

$$J = \frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{base} \quad (2.4)$$

Persamaan (2.4) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.2), menjadi:

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{base} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (2.5)$$

Atau

$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{0m}} \right) = \frac{T_m - T_e}{VA_{base}/\omega_{0m}} \quad (2.6)$$

Dimana $T_{base} = VA_{base}/\omega_{0m}$, persamaan di atas diubah menjadi bentuk per unit, sehingga

$$2H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (2.7)$$

Pada persamaan diatas,

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{0m}} = \frac{\omega_r}{\omega_0} \quad (2.8)$$

ω_r adalah kecepatan sudut dari rotor dalam satuan *electrical rad/s*, sedangkan ω_0 adalah kecepatan sudut pada kondisi sinkron dalam satuan *electrical rad/s*.

Jika δ adalah posisi angular dari rotor dalam *electrical radian* yang berhubungan dengan referensi putaran sinkron dan δ_0 adalah nilai pada saat $t = 0$,

$$\delta = \omega_r t - \omega_0 t + \delta_0 \quad (2.9)$$

Hasil penurunan terhadap waktu, didapatkan

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 = \Delta\omega_r \quad (2.10)$$

dan

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt} = \omega_0 \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_0 \frac{d(\Delta\bar{\omega}_r)}{dt} \quad (2.11)$$

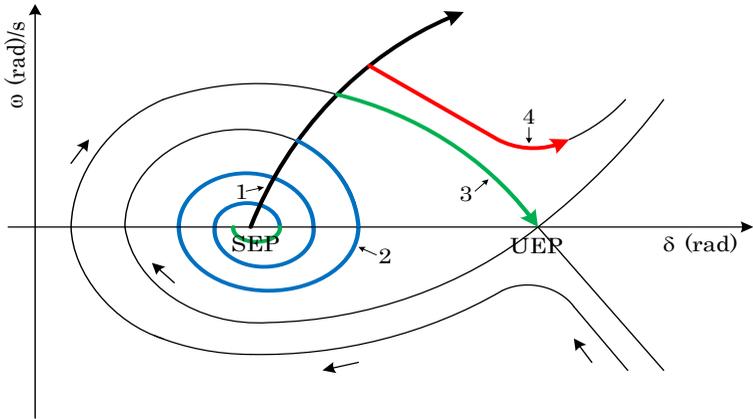
Substitusikan $d\bar{\omega}_r/dt$ pada persamaan diatas kedalam persamaan 2.5, sehingga didapatkan:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \quad (2.8)$$

Persamaan 2.7 merupakan persamaan yang menunjukkan persamaan ayunan atau persamaan gerakan pada mesin sinkron. Nilai daya mekanis (P_m) dan daya elektrik (P_e) hampir sama dengan nilai torsi mekanis (T_m) dan torsi elektrik (T_e).

2.4. Lintasan Kritis (*Critical Trajectory*)

Lintasan kritis (*Critical Trajectory*) adalah lintasan (*trajectory*) yang dimulai dari titik terjadinya gangguan (*Fault-on Trajectory*) hingga mencapai titik kritis dimana sistem kehilangan sinkronisasinya (*loss of synchronism*) [4]-[6]. Dari lintasan ini dapat dilihat batas kestabilan suatu sistem tenaga listrik dan digunakan untuk meminimalisasi masalah yang terjadi pada perhitungan nilai UEP (*Unstable Equilibrium Point*) sehingga didapatkan nilai CCT untuk mencapai kestabilan pada sistem tenaga listrik.



Gambar 2.4. Lintasan kritis satu generator terhubung ke bus *infinite* dengan peredam (*Damping*)

Pada gambar 2.4 menunjukkan beberapa *trajectory* dari sebuah mesin generator yang terhubung dengan bus *infinite*. Lintasan “1” menunjukkan *fault on trajectory* yakni lintasan saat terjadi gangguan yang dimulai dari *Stable Equilibrium Point (SEP)*. Pada lintasan “2” menunjukkan sistem mencapai kestabilan setelah gangguan dihilangkan sebelum waktu pemutus kritisnya (*CCT*). Lintasan “4” menunjukkan ketidakstabilan sistem saat gangguan terlambat diisolasi. Sedangkan lintasan “3” merupakan lintasan kritis (*critical trajectory*) yang merupakan lintasan kritis suatu sistem tenaga listrik. Lintasan ini akan mencapai *Unstable Equilibrium Point (UEP)* yakni titik kritis dari sistem.

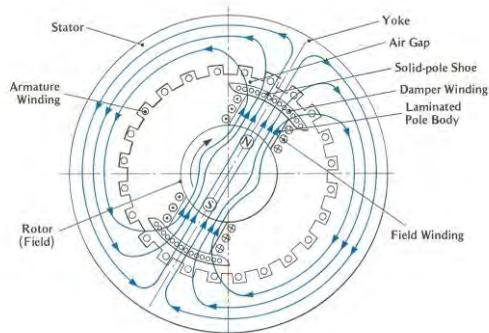
2.5. Critical Clearing Time (CCT)

Pengisolasian area akibat suatu gangguan yang besar menyebabkan perubahan struktural pada sistem tenaga listrik. Pengisolasian tersebut dilakukan dengan pemutusan saluran melalui *circuit breaker (CB)* saluran maupun pelepasan generator dari sistem melalui *circuit breaker (CB)* generator. Rele pengaman akan bekerja sekitar 0,2 - 0,3 sekon untuk membuka *circuit breaker (CB)* saat terjadi gangguan, sehingga sistem akan aman dari gangguan. Namun skema tersebut tidak

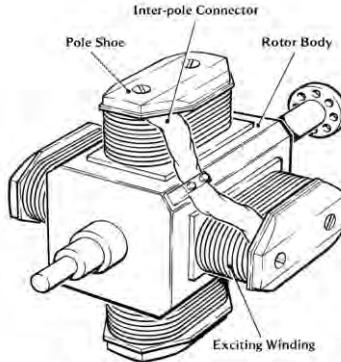
menjamin sistem akan kembali stabil (*steady-state*). Pemutusan saluran maupun pelepasan generator melalui *circuit breaker*(CB) harus kurang dari waktu pemutus kritisnya atau *critical clearing time* (*cct*). Jika gangguan diputus kurang dari waktu kritisnya, maka sistem akan kembali stabil. Namun, jika gangguan diputus lebih dari waktu kritisnya, maka generator akan berada pada kondisi tidak stabil.

2.6. Damper Winding

Kumparan peredam atau *damper winding* dipasang pada permukaan kutub pada generator kutub menonjol, terdiri atas batang tembaga yang dipasang *short circuit* melalui permukaan kutub sama dengan lilitan sangkar bajing pada motor induksi. Kumparan ini berfungsi sebagai peredam osilasi mekanik rotor ketika generator berputar dalam kecepatan sinkron . Gambar 2.5 merupakan konstruksi dari generator sinkron. *Damper winding* ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.5. Kontruksi generator sinkron.



Gambar 2.6. *Damper winding* yang terpasang pada rotor generator sinkron dengan 4-pole

Secara umum generator sinkron bekerja pada kondisi sinkron, dimana kecepatan putar rotor sama dengan kecepatan medan putar stator. Ketika terjadi gangguan, maka akan terjadi fluktuasi putaran sehingga dapat mengganggu kestabilan sistem. Penambahan *damper winding* pada rotor membuat fluktuasi putaran menjadi berkurang. Hal ini disebabkan *damper winding* akan menginduksi stator agar kecepatan medan putar stator sama dengan kecepatan putar rotor. Sehingga, generator akan cepat kembali pada kondisi sinkron sehingga sistem kembali stabil.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 PEMODELAN SISTEM

Dalam perhitungan untuk mendapatkan nilai CCT perlu dilakukan beberapa langkah awal untuk menghasilkan parameter-parameter awal yang dibutuhkan. Langkah-langkah tersebut yang menjadi alur perhitungan untuk mendapatkan nilai CCT.

3.1. Power Flow

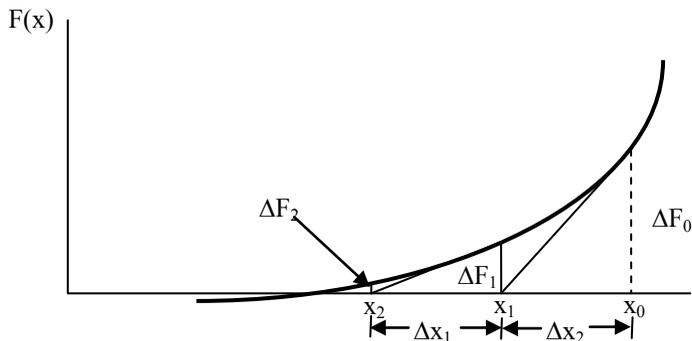
Power Flow merupakan langkah pertama untuk mendapatkan nilai CCT. Dari proses *power flow* akan didapatkan parameter-parameter awal yang akan dilakukan iterasi pada langkah selanjutnya. Dalam proses ini akan dilakukan pembacaan data dan pemilahan data-data yang diperlukan. Selanjutnya akan dilakukan penomoran pada bus-bus yang saling terhubung, baik itu bus beban ataupun bus generator dalam bentuk matrik Y_{bus} seperti pada persamaan (3.1).

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Setelah dilakukan pembacaan data sistem maka dilakukan perhitungan untuk mengetahui aliran daya dari sistem tersebut. *Power flow* kemudian dapat dihitung dari matrik admitansi sistem. Secara umum persamaan power flow ditunjukkan pada persamaan (3.2).

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \quad (3.2)$$

Metode Newton Raphson merupakan sebuah metode yang dikembangkan dari deret *Taylor* untuk mendapatkan turunan persamaan matematika dalam penentuan matrik Jacobian yang akan digunakan sebagai dasar perhitungan iterasinya[2]. Metode ini diaplikasikan pada sistem yang memiliki banyak persamaan yang belum diketahui. Gambar 3.1 ilustrasi dari metode Newton Raphson.



Gambar 3.1. Ilustrasi metode Newton Raphson.

Persamaan Deret Taylor ditunjukkan pada persamaan dibawah (3.3):

$$f(x) = f(x_0) + \frac{1}{1!} \frac{df(x_0)}{dx} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f(x_0)}{dx^2} (x - x_0)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} (x - x_0)^n = 0 \quad (3.3)$$

Untuk perhitungan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) didapatkan dari persamaan:

$$P = VI \cos \theta \quad (3.4)$$

Dengan,

$$I = V.Y \quad (3.5)$$

Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan (3.5) ke dalam persamaan (3.1.4) maka didapatkan persamaan (3.6):

$$P = V_1 V_2 Y \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (3.6)$$

Persamaan (3.6) apabila diterapkan pada analisis banyak mesin/multimesin, maka persamaan yang didapatkan yaitu:

$$P_1 = Y_{11} V_1 V_1 \cos(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (3.7)$$

$$P_1 = V_1^2 Y_{11} \cos(\theta_{11}) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (3.8)$$

Dengan menstutitusikan persamaan (3.9) kedalam persamaan (3.8)

$$Y = G + jB \quad (3.9)$$

$$G = Y \cos \theta ; B = Y \sin \theta \quad (3.10)$$

Maka,

$$P_1 = V_1^2 G_{11} + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 + \delta_n) \quad (3.11)$$

Pada bus yang lain dapat dihitung dayanya menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{i,i \neq j}^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.12)$$

Persamaan Q dapat diturunkan dari persaman

$$Q = VI \sin \theta \quad (3.13)$$

Sehingga,

$$Q = V_1 V_2 Y \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (3.14)$$

jika persamaan tersebut diterapkan pada analisis banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapatkan yaitu:

$$Q_1 = Y_{11} V_1 V_1 \sin(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.15)$$

$$Q_1 = V_1^2 Y_{11} \sin(\theta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.16)$$

Dengan menstutitusikan persamaan (3.9) ke dalam persamaan (3.16) maka didapat persamaan sebagai berikut,

$$Q_1 = V_1^2 B_{11} + Y_{12} V_1 V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.17)$$

jika pada banyak mesin/ multimesin, maka persamaan yang didapat yaitu:

$$Q_i = V_i^2 B_{ii} - \sum_{i,i \neq j}^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.18)$$

Keterangan:

P_i : daya aktif terbangkit pada bus ke- i

Q_i : daya reaktif terbangkit pada bus ke- i

Y_{ij}, θ_{ij} : magnitude dan sudut fasa elemen matrik admitansi Y

V_i, δ_i : magnitude tegangan dan sudut fasa pada bus ke- i

V_j, δ_j : magnitude tegangan dan sudut fasa pada bus ke- j

Setelah mengetahui daya dan tegangan tiap bus, maka selanjutnya adalah menentukan matrik Jacobian untuk iterasi selanjutnya. Matrik Jacobian sendiri terdiri dari komponen H , komponen N , komponen J ,

dan komponen L . Matrik Jacobian beserta komponen-komponennya yaitu:

$$\text{Jacobian matrik} = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Dengan komponennya:

$$H = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \quad (3.20)$$

$$N = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (3.21)$$

$$J = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \quad (3.22)$$

$$L = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| \quad (3.23)$$

Sehingga, untuk mencari aliran daya pada tiap bus dapat diketahui dengan persamaan berikut:

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \frac{\Delta|V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Selanjutnya dari perkalian matrik Jacobian diatas, akan didapat nilai dari $\Delta\theta_i$ dan $\Delta|V_i|$ yang digunakan sebagai *update* sudut dan magnitude tegangan tiap bus yaitu:

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta\theta_i \quad (3.25)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i| \quad (3.26)$$

Dimana :

- $(k+1)$: jumlah iterasi newton raphson
- $\Delta\theta_i$: Perubuaaha sudut tegangan pada bus ke- i
- $\Delta|V_i|$: Perubahan magnitude tegangan pada bus ke- i

Kemudian selisih daya aktif dan reaktif tiap bus yang baru dengan yang lama akan dibandingkan dengan ketelitian yang telah ditentukan. Apabila nilai ketelitian tercapai, maka proses iterasi berhenti, namun jika nilai ketelitian belum tercapai maka iterasi akan terus dilanjutkan

3.2. Reduksi Matrik

Sistem yang sangat kompleks menyebabkan analisis perhitungan matematis pada kestabilan transien menjadi sangat rumit. Untuk mengurangi kerumitan tersebut perlu dilakukan reduksi agar mempermudah dalam analisis dan perhitungan matematis yang akan dilakukan. Langkah untuk menyederhanakannya adalah dengan reduksi Kron. [2]

Reduksi kron adalah mereduksi bus beban dari matrik admitansi, sebab tidak ada arus yang masuk maupun keluar sehingga bernilai nol. Untuk merepresentasikan matrik admitansi dari sistem dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{n+1} \\ \vdots \\ I_{n+m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} & Y_{1(n+1)} & Y_{1(n+2)} & \cdots & Y_{1(n+m)} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} & Y_{2(n+1)} & Y_{2(n+2)} & \cdots & Y_{2(n+m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} & Y_{n(n+1)} & Y_{n(n+2)} & \cdots & Y_{n(n+m)} \\ Y_{(n+1)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+1)n} & Y_{(n+1)(n+1)} & \cdots & \cdots & Y_{(n+1)(n+m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ Y_{(n+m)1} & \cdots & \cdots & Y_{(n+m)n} & Y_{(n+m)(n+1)} & \cdots & \cdots & Y_{(n+m)(n+m)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \\ E_{n+1} \\ \vdots \\ E_{n+m} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Agar lebih sederhana maka matrik di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Dimana lambang n menunjukkan bus beban sedangkan lambang m menunjukkan bus generator. Karena tidak ada arus yang mengalir pada bus beban, maka I_n bernilai nol, sehingga persamaan matriknya menjadi:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Sehingga dari perkalian matrik di atas dapat diturunkan menjadi dua persamaan matematis yakni persamaan (3.30) dan (3.32):

$$Y_n V_n + Y_{nm} E_m = 0 \quad (3.30)$$

$$V_n = -\left(\frac{Y_{nm} E_m}{Y_n}\right) = -(Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) \quad (3.31)$$

$$Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E_m = I_m \quad (3.32)$$

Dengan menstutbitusikan persamaan V_n pada persamaan (3.31) ke dalam persamaan (3.32) maka akan didapatkan persamaan:

$$I_m = Y_{nm}^t (-Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.33)$$

$$I_m = -(Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} E_m) + Y_{mm} E_m \quad (3.34)$$

Persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi persamaan:

$$I_m = Y_{reduksi} E_m \quad (3.35)$$

Dimana:

$$Y_{reduksi} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} \quad (3.36)$$

Dengan demikian sistem yang begitu kompleks menjadi lebih sederhana. Sehingga, dapat mempermudah dalam perhitungan dan analisis kestabilan transien.

3.3. Pemodelan Sistem

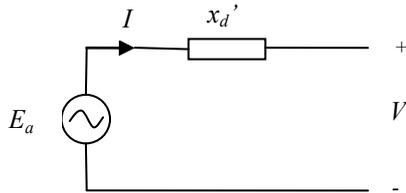
Sistem dimodelkan seperti pada persamaan persamaan ayunan berikut ini:

$$M \dot{\omega} = P_m - P_e \quad (3.37)$$

Dimana :

- M : momen inersia
- $\dot{\omega}$: percepatan sudut
- P_m : daya mekanis
- P_e : daya elektrik

Untuk mendapatkan nilai P_m dapat dicari dengan memodelkan generator seperti pada gambar 3.2:



Gambar 3.2. Pemodelan Generator.

Dari pemodelan di atas dapat ditulis dengan persamaan:

$$E_a = j x'_d I + V_t \quad (3.38)$$

Dengan menstutitusikan persamaan (3.39) ke dalam persamaan (3.38)

$$I = \frac{S}{V} \quad (3.39)$$

Dimana:

$$S = P + jQ \quad (3.40)$$

Maka didapat persamaan:

$$E_a = V_t + j x'_d \cdot \frac{S}{V} \quad (3.41)$$

Dengan demikian daya mekanis dari generator dapat dicari dengan persamaan:

$$P_m = E_a^* \cdot Y_{red_pre} \cdot E_a \quad (3.42)$$

Untuk daya listrik (P_e) dapat dicari dengan persamaan:

$$P_e = v \cdot (Y_{red_post} \cdot v)^* \quad (3.43)$$

Dimana v dapat dicari dari persamaan(3.44)

$$v = E_a^{j\theta} \quad (3.44)$$

Pemodelan sistem tenaga multi mesin yang terhubung bus *infinite* ditentukan dengan pemodelan Xd' generator, dimana tiap generator direpresentasikan dengan dua persamaan diferensial. Persamaan ayunan seperti yang telah ditunjukkan di atas dengan D adalah konstanta *damping*:

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e(\delta) - D_i\omega_i \quad (3.45)$$

$$\delta_i \dot{=} \omega_i \quad (3.46)$$

3.4. Perumusan Masalah

Perhitungan Kestabilan transient dihitung dengan nilai awal (*initial point*) sistem saat berada dalam kondisi stabil didefinisikan sebagai x_{pre} , ketika gangguan terjadi pada saat $t=0$. Kemudian sistem diatur oleh persamaan dinamis saat gangguan (*fault-on*) seperti pada persamaan berikut,

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad (3.47)$$

Dimana $x \in R^N, t \in R, f_F: R^N \rightarrow R^N$

Hasil dari persamaan 3.47 adalah *fault-on trajectory*, yakni lintasan pada saat terjadi gangguan. Persamaan ini juga dapat ditulis sebagai,

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.48)$$

Dimana $X_F(t; x_{pre}): R \rightarrow R^N$

Gangguan dapat dihilangkan pada saat $t=\tau$. Sistem diatur oleh persamaan dinamis setelah gangguan. Persamaan ini juga dapat ditulis sebagai,

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3.49)$$

Hasil dari persamaan 3.49 adalah *post fault trajectory* yaitu lintasan setelah terjadi gangguan. Persamaan ini juga dapat ditulis sebagai,

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(t; x^0: R^N \rightarrow R^N) \quad (3.50)$$

Sebagai catatan x^0 adalah titik pada lintasan kritis saat gangguan (*fault on trajectory*) saat $t = \tau$.

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.51)$$

3.4.1. Metode Runge-Kutta Orde 4

Metode Runge-Kutta digunakan untuk mencari besaran nilai awal X^0 yang dibutuhkan untuk melakukan metode *critical trajectory*. Metode Runge-Kutta memperkirakan penyelesaian dari deret Taylor, meskipun tidak seperti penyelesaian deret Taylor yang sesungguhnya. Metode Runge-Kutta tidak membutuhkan evaluasi eksplisit dari turunan yang lebih tinggi dari sebelumnya. Efek dari adanya turunan yang lebih tinggi adalah dimasukkannya beberapa evaluasi dari turunan yang pertama.

Dalam metode ini akan digunakan Runge-Kutta orde 4 dimana nilai X diperoleh ketika $t = t_0 + \Delta t$ yang secara umum memiliki persamaan:

$$X_{n+1} = X_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.52)$$

Dimana,

$$k_1 = f(X_n, t_n) \Delta t \quad (3.53)$$

$$k_2 = f\left(X_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (3.54)$$

$$k_3 = f\left(X_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (3.55)$$

$$k_4 = f(X_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t \quad (3.56)$$

Intepretasi fisik dari persamaan di atas adalah;

k_1 = (lengkungan pada saat awal *time step*) * Δt

k_2 = (pendekatan pertama pada lengkungan di pertengahan step)

$$k_3 = (\text{pendekatan kedua pada lengkungan di pertengahan step})^* \Delta t$$

$$k_4 = (\text{lengkungan pada akhir step})^* \Delta t$$

3.4.2 Modifikasi Persamaan Trapezoidal

Perhitungan *trapesoidal*, hasil dari persamaan (3.50) pada saat t^k dinotasikan dengan x^k , sehingga persamaan *trapesoidal* konvensional menjadi,

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.57)$$

Dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.58)$$

Pada persamaan ini k digunakan sebagai *state transition number* terhadap waktu.

Modifikasi persamaan trapezoidal menitikberatkan pada kondisi ketika gangguan dihilangkan saat CCT dan variabel yang konvergen ke titik akhir seperti yang dinyatakan sebelumnya. Dalam beberapa kasus tertentu, titik akhir sama dengan UEP (*unstable equilibrium point*) dan lintasan mencapai UEP dalam waktu yang tak terbatas. Namun dalam tugas akhir ini titik akhir tidak mencapai UEP. Gambar 3.3 menunjukkan lintasan kritis (*critical trajectory*), dimana dua titik batas, x^0 dan x^u , adalah titik awal di CCT dan titik akhir. Untuk memperoleh lintasan kritis menjadi sangat sulit ketika diperlukan waktu yang tak terbatas untuk dapat mencapai UEP. Untuk menghindari masalah tersebut, metode baru untuk integrasi numerik telah dikembangkan sebagai berikut.

Pertama, jarak antara dua titik dalam didefinisikan sebagai:

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2}|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|(t^{k+1} - t^k) \quad (3.59)$$

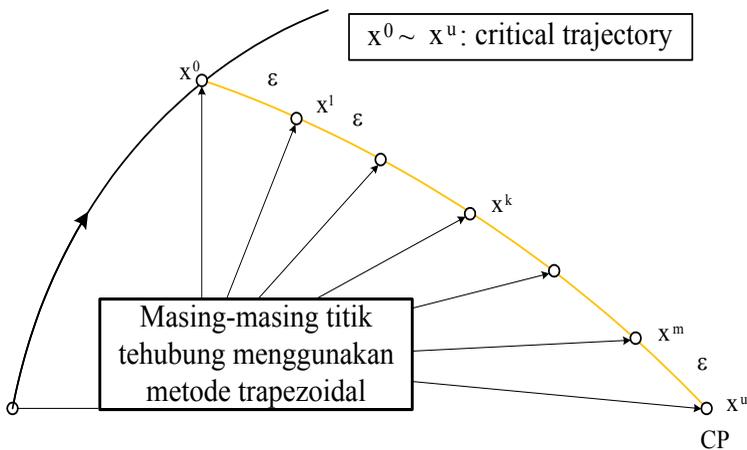
Kemudian durasi waktu ditransformasikan pada jarak, yang ditunjukkan pada persamaan berikut:

$$(t^{k+1} - t^k) = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.60)$$

Dengan persamaan (3.60) disubstitusikan ke dalam persamaan (3.57), sehingga menjadi persamaan,

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} - \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.61)$$

Dengan menggunakan persamaan (3.61), integrasi numerik terhadap domain waktu akan ditransformasikan menjadi integrasi terhadap domain jarak seperti yang terlihat pada gambar 3.2 berikut,



Gambar 3.3. Konsep dari modifikasi metode trapezoidal

Kondisi titik awal (*Initial point*) adalah titik awal pada *fault-on trajectory* ketika gangguan tersebut diputus saat CCT. Persamaannya adalah

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) = 0 \quad (3.62)$$

Dengan, $CCT = \tau$

Berdasarkan gambar 3.3 persamaan minimalisasi ditunjukkan pada persamaan 3.63.

$$G(x) \begin{cases} x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|x^{k+1} + x^k|} \varepsilon = 0 \\ x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) = 0 \\ \text{titik akhir } (x^u) \end{cases} \quad (3.63)$$

3.4.3. Matriks Jacobian

Persamaan *trapezoidal* akan dijadikan persamaan dasar pada matriks Jacobian. Pada gambar 3.4 ditunjukkan konfigurasi dan dimensi matriks jacobian

ian untuk model Xd' generator tanpa kontroler. Elemen A menunjukkan model Xd' generator tanpa kontroler. Jumlah variabel dan persamaan adalah $NODE \times NG \times (m + 2) + 2$ dan $NODE \times NG \times (m + 2)$.

Dimana A adalah

$$A = \frac{\partial G_t^k(x)}{\partial \tilde{\omega}_t^k} \quad (3.64)$$

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \underbrace{\text{NG x (m+2)}} \\
 \underbrace{\tilde{\omega}_1^0 \dots \tilde{\omega}_{NG}^{m+1}} \\
 \underbrace{\text{NG x (m+1)}} \\
 \underbrace{\tilde{\omega}_1^0 \dots \tilde{\omega}_{NG}^m} \\
 \underbrace{\text{NG x (m+1)}} \\
 \underbrace{\theta_1^0 \dots \theta_{NG}^m} \\
 \underbrace{\text{NODE x NG}} \\
 \underbrace{f_\theta \ f_{\tilde{\omega}_1} \dots \ f_{\tilde{\omega}_{NG}}}
 \end{array}
 \begin{bmatrix}
 A\tilde{\omega}\tilde{\omega} & A\tilde{\omega}\theta & A\tilde{\omega}\varepsilon & A\tilde{\omega}\tau \\
 A\theta\tilde{\omega} & A\theta\theta & A\theta\varepsilon & A\theta\tau \\
 Af\tilde{\omega} & Af\theta & Af\varepsilon & Af\tau
 \end{bmatrix}
 \begin{array}{c}
 \underbrace{\text{NG x (m+2)}} \\
 \underbrace{\theta_1^0 \dots \theta_{NG}^{m+1}} \\
 \underbrace{1} \\
 \underbrace{\varepsilon} \\
 \underbrace{1} \\
 \underbrace{\tau}
 \end{array}
 \end{array}$$

NODE = Number of Ordinary Differential Equation
NG = Number of Generator

Gambar 3.4. Konfigurasi dan dimensi matriks Jacobian

3.4.4. Metode Newton-Raphson

Metode Newton-Raphson digunakan untuk menentukan nilai dari titik –titik pada persamaan 3.63 sebagai persamaan pada matriks Jacobian secara umum.

Diasumsikan X_s sebagai solusi dari $G(X)$. kemudian, X_s diberi nilai awal X_0 dan batas kesalahan (*error*) ΔX .

$$X_s = X_0 + \Delta X \quad (3.65)$$

Substitusikan persamaan (3.65) ke dalam $G(X)$ dan didapatkan dari deret *taylor*, maka dapat dituliskan persamaan:

$$G(X_0 + \Delta X) \cong G(X_0) + \left[\frac{\partial G(X_0)}{\partial X} \right] \Delta X \quad (3.66)$$

Disaat batas kesalahan persamaan (3.66) sangat kecil, mendekati nilai nol, dan $G(X_s)=0$, maka dapat dituliskan persamaan:

$$G(X_0) + J\Delta X \cong 0 \quad (3.67)$$

Dimana J adalah matriks Jacobian. Sehingga dapat dituliskan:

$$J \equiv \frac{\partial G(X)}{\partial X} \quad (3.68)$$

Dengan nilai *error* b adalah: $b \equiv G(X_0)$ dan batas *error* adalah ε , $\varepsilon \equiv J\Delta X + b$, maka nilai *error* dan batas *error* dapat sederhanakan menjadi:

$$f = \varepsilon^T \varepsilon \quad (3.69)$$

Substitusikan persamaan $\varepsilon \equiv J\Delta X + b$ ke persamaan (3.69), sehingga didapatkan persamaan:

$$f = (J\Delta X + b)^T (J\Delta X + b) \quad (3.70)$$

Dari penyederhanaan persamaan *error*, akan dihitung nilai ΔX , pada persamaan:

$$f' = J^T (J\Delta X + b)^T (J\Delta X + b) J = 0 \quad (3.71)$$

Sehingga didapatkan persamaan:

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T b \quad (3.72)$$

Dengan mensubstitusikan $\equiv G(X_0)$ ke persamaan (3.72), maka didapatkan persamaan:

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T G(X_0) \quad (3.73)$$

Nilai awal yang baru akan didapatkan dengan menambahkan nilai *error*-nya (ΔX) ke nilai awal yang lama, sehingga nilai awal barunya:

$$X_{new} = X_{old} + \Delta X \quad (3.74)$$

Kondisi konvergen akan dicapai ΔX saat $\text{Max } |dx_i|$ cukup kecil.

3.5. Kondisi Kritis Saat Hilangnya Sinkronisasi

Pada *single machine*, kekuatan sinkronisasi akan hilang ketika $\partial T / \partial \theta = 0$ atau $\partial P / \partial \theta = 0$. Dimana T dan P masing-masing adalah torsi dan daya sinkronisasi, θ adalah sudut rotor. Pada *multi-machine* dapat dituliskan berdasarkan kondisi hilangnya kekuatan sinkronisasi sehingga dirumuskan dengan matriks koefisien sebagai berikut :

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v \quad \text{dengan } v \neq 0 \quad (3.75)$$

Dimana $v \in R^{N_{Gen}}$ adalah *eigenvector* yang berhubungan dengan matrik *zero eigenvalue* $[\partial P / \partial \theta] \in R^{N_{Gen} \times N_{Gen}}$, dan N_{Gen} adalah jumlah dari generator. Dengan kondisi *eigenvector* harus sesuai dengan perubahan arah dari θ . Hal tersebut dapat ditulis dengan persamaan (3.75) dengan $k_s \in R$:

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \quad (3.76)$$

Dapat diasumsikan kondisi (3.75) dan (3.76) sebagai titik akhir pada lintasan kritis. Meskipun hal tersebut bukan lah bukti yang lengkap dari kondisi stabilitas pada sistem dinamis, persamaan yang

mewakili kondisi stasioner untuk torsi atau daya sinkronisasi, adalah sebagai berikut:

$$\dot{P} = 0 \quad (3.77)$$

P adalah fungsi dari sudut rotor generator, maka persamaan berikut berlaku :

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad (3.78)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa persamaan (3.76) dan (3.77) ekuivalen satu sama lain dalam kondisi (3.75). Kemudian, kondisi baru yang diusulkan adalah untuk menentukan kondisi stasioner untuk T atau P yang disebabkan oleh kejanggalan pada matriks torsi/daya sinkronisasi.

Metode modifikasi hilangnya sinkronisasi ini menentukan titik akhir lintasan kritis tanpa mempertimbangkan arah *eigenvector* dari θ terhadap UEP (*unstable equilibrium point*) sehingga tidak mempertimbangkan pula v dan konstanta k . Kondisi titik akhirnya menjadi persamaan (3.78) saja yakni,

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta}$$

3.6. Perumusan Minimalisasi

Untuk menentukan kondisi kritis dalam kestabilan transien dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, ks, v} \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \right\} \quad (3.79)$$

Dimana $x^k \in R^N, \varepsilon \in R, \tau \in R$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \varepsilon \quad (3.80)$$

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.81)$$

Dengan kondisi batasan

$$x^0 = X_F(\tau, x_{pre}) \quad (3.82)$$

$$\mu^{m+1} = \left[\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot \hat{\theta} \right] \quad (3.83)$$

Dimana W adalah matriks pembobot dengan diagonal matriks yang bernilai positif. Karena pemilihan W tidak mempengaruhi konvergensi atau akurasi metode yang diusulkan, maka matriks identitas akan digunakan untuk W simulasi. Setelah melakukan minimalisasi pada persamaan (3.79), μ^k akan menjadi bernilai nol dengan persamaan *trapezoidal* akan menghubungkan ke semua titik x^k , $k=0$ hingga $m + 1$. Persamaan (3.82) adalah kondisi batasan untuk titik awal (*initial point*), persamaan tersebut menunjukkan *fault-on trajectory* sebagai fungsi dari waktu *clearing* gangguan (τ). Sementara itu persamaan (3.83) adalah kondisi batasan lain, dimana batasan tersebut mengabaikan *sub-vector* dari X^{m+1} .

Dalam metode ini, kesalahan numerik μ^k adalah hasil akumulasi seiring peningkatan k sehingga titik akhir pada umumnya memiliki kesalahan yang cukup besar. Di sisi lain, metode ini menentukan titik akhir tambahan seperti dalam persamaan (3.83). kemudian menyelesaikan persamaan yang tidak diperlukan sebagai minimisasi permasalahan sehingga error μ^k benar-benar didistribusikan.

Solusi dari persamaan (3.79) - (3.83) ditafsirkan sebagai berikut. Penentuan x^k , $k = 0$ hingga $m + 1$ yang merepresentasikan lintasan kritis, dimana ε secara otomatis ditentukan ketika jumlah integrasi m telah ditentukan, *CCT* dan titik akhir masing-masing diperoleh sebagai τ dan x^{m+1} .

3.7 Perhitungan *Critical Clearing Time*

Untuk menentukan *Critical clearing time (CCT)* pada tugas akhir ini, maka diperlukan tahapan-tahapan sebagai berikut :

1. Penentuan *trajectory* saat gangguan (*fault-on trajectory*) yang didapatkan melalui integrasi numerik menggunakan *runge-kutta* dan didapatkan $x^0(\tau)$ sebagai nilai awal, persamaan (3.82).
2. Persamaan (3.45) dan (3.46) untuk mendefinisikan persamaan (3.80).
3. Perumusan minimalisasi pada persamaan (3.79) – (3.83) diselesaikan menggunakan metode *Newton-Raphson* dengan $\text{Max } |dx_i| < 0.01$ sebagai syarat konvergensi untuk mendapatkan *CCT*.

Berikut ini adalah susunan dari matriks Jacobian yang digunakan dengan modifikasi *losing synchronism* untuk titik akhirnya.

Persamaan 1

$$P^{m+1} = P_{m_i}^{m+1} - P_{e_i}^{m+1}(\theta) \quad (3.84)$$

Dari persamaan (3.84) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P^{m+1} = P_{m_i}^{m+1} - \sum_{j=i}^{NG} Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(-\theta_i^{m+1} + \theta_j^{m+1} + \alpha_{ij}^{m+1})$$

$$P^{m+1} = P_{m_i}^{m+1} - \sum_{j=i}^{NG} \left[Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(\delta_i^{m+1} - \delta_j^{m+1}) + \cos(\theta_i^{m+1}) \right]$$

$$P^{m+1} = P_{m_i}^{m+1} - G_{ii}^{m+1} (E_i^{m+1})^2 \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{ij}^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1}) + B_{ijm+1} \sin \theta_{im+1})] \quad (3.85)$$

Sehingga komponen matriks Jacobian J_1 adalah :

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_i^{m+1}} & \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} \\ \frac{\partial P_j^{m+1}}{\partial \theta_i^{m+1}} & \frac{\partial P_j^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i^{m+1} \\ \vdots \\ \theta_j^{m+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

Persamaan 3.86 dapat disederhanakan sebagai berikut,

$$J_1 = |Dsa| \times \dot{\theta} \quad (3.87)$$

Sehingga penurunannya menjadi,

$$Dsa_{ii}^{m+1} = \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_i^{m+1}}$$

$$Dsa_{ij}^{m+1} = \frac{\partial P_i^{m+1}}{\partial \theta_j^{m+1}} \quad (3.88)$$

$D\acute{s}a$ (turunan dari Dsa) dinamakan Dpa dan dapat dituliskan sebagai berikut,

$$Dpa_{ii}^{m+1} = \frac{Dsa_{ii}}{\partial \theta_i^{m+1}}$$

$$Dpa_{ij}^{m+1} = \frac{Dsa_{ij}}{\partial \theta_i^{m+1}} \quad (3.89)$$

Sehingga persamaan (3.87) dan (3.88) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Dsa_{ii}^{m+1} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{ij}^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1}) - B_{ij}^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1}))]$$

$$Dsa_{ij}^{m+1} = E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{ij}^{m+1} \sin(\theta_{ij}^{m+1}) - B_{ij}^{m+1} \cos(\theta_{ij}^{m+1})) \quad (3.90)$$

$$Dpa_{ii}^{m+1} = - \sum_{j=1, j \neq i}^{NG} [E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{ij}^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1}) + B_{ij}^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1}))]$$

$$Dpa_{ij}^{m+1} = [E_i^{m+1} E_j^{m+1} (G_{ij}^{m+1} \cos(\theta_{ij}^{m+1}) - B_{ij}^{m+1} \sin(\theta_{ij}^{m+1}))] \quad (3.91)$$

Komponen J_l diturunkan terhadap θ dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial J_1}{\partial \theta} = \frac{\partial^2 P^{m+1}}{\partial \theta_i^2} \dot{\theta}^{m+1} + \frac{\partial P}{\partial \theta} \partial \dot{\theta} \quad (3.92)$$

Dari persamaan-persamaan di atas, dapat terbentuk matriks jacobian yang digunakan pada modifikasi *losing synchronism* sebagai titik akhirnya. Susunan matriks jacobian ditunjukkan pada gambar 3.3.

$$\begin{array}{c}
\begin{array}{c}
\text{NG} \\
\text{NG} \\
\text{NG} \\
\text{NG} \\
\text{NG}
\end{array}
\begin{array}{c}
\left. \begin{array}{c}
\omega_1^m \\
\omega_1^m \dots \omega_{NG}^m
\end{array} \right\} \text{NG} \times m \\
\left. \begin{array}{c}
\theta_1^m \\
\theta_1^m \dots \theta_{NG}^m
\end{array} \right\} \text{NG} \times m \\
\left. \begin{array}{c}
\varepsilon \\
\tau
\end{array} \right\} \text{NG} \\
\left. \begin{array}{c}
\tau \\
\text{End point}
\end{array} \right\} \text{NG}
\end{array}
\begin{array}{c}
\left. \begin{array}{c}
\omega_1^0 \dots \omega_{NG}^{m+1} \\
\theta_1^0 \dots \theta_{NG}^{m+1}
\end{array} \right\} \text{NG} \times (m+2) \\
\left. \begin{array}{c}
\varepsilon \\
\tau
\end{array} \right\} 1 \\
\left. \begin{array}{c}
\varepsilon \\
\tau
\end{array} \right\} 1
\end{array}
\begin{array}{c}
A\tilde{\omega}\tilde{\omega} \quad A\tilde{\omega}\theta \quad A\tilde{\omega}\varepsilon \quad A\tilde{\omega}\tau \\
A\theta\tilde{\omega} \quad A\theta\theta \quad A\theta\varepsilon \quad A\theta\tau \\
A\varepsilon\tilde{\omega} \quad A\varepsilon\theta \quad A\varepsilon\varepsilon \quad A\varepsilon\tau \\
A\tau\tilde{\omega} \quad A\tau\theta \quad A\tau\varepsilon \quad A\tau\tau
\end{array}
\end{array}
\left. \begin{array}{c}
\text{---} \\
\text{---} \\
\text{---} \\
\text{---} \\
\text{---}
\end{array} \right\} \text{---}
\begin{array}{c}
2 \times \text{NODE} \times \text{NG} \times (m+2) + 2 \\
J_1 = |Dsa| \times \dot{\theta}
\end{array}$$

Gambar 3.5. Susunan matriks Jacobian untuk perhitungan CCT menggunakan modifikasi metode hilangnya sinkronisasi.

Pada sistem multimesin yang terhubung pada *infinite bus*, *infinite bus* digunakan sebagai referensi pada sistem. Pada kasus ini generator 1 yang dipilih sebagai *infinite bus*. Dengan nilai $\frac{\partial P}{\partial \theta}$ pada generator 1 bernilai nol sedangkan untuk susunan matriks Jacobian sama dengan sistem multi mesin normal yang tidak terhubung dengan *infinite bus*.

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

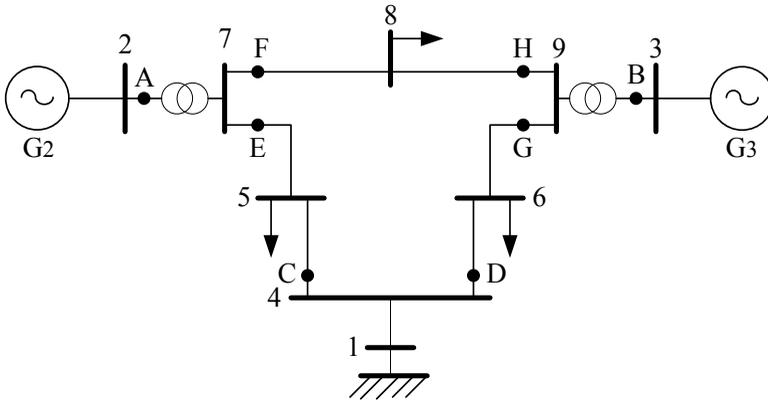
Dalam bab ini, simulasi akan dilakukan pada sistem yang menunjukkan sistem multi mesin. Sistem yang digunakan adalah sistem tenaga listrik Anderson dan Fouad 3 generator- 9 bus dan 6 generator-30 bus. Setiap saluran transmisi terdiri dari sirkuit paralel ganda, kemudian terjadi gangguan 3 fasa pada salah satu sirkuit yang dekat dengan bus. Setelah beberapa saat, gangguan diputus dengan membuka sirkuit yang terkena gangguan.

Dari hasil simulasi ini akan didapat parameter-parameter yang diperlukan dalam perhitungan *critical clearing time (CCT)*. Spesifikasi dari sebuah perangkat komputer (CPU) yang digunakan sangat berpengaruh dalam kecepatan proses iterasinya. Oleh karena itu dibawah ini akan ditunjukkan spesifikasi dari komputer (CPU) yang digunakan.

1. *System manufacturer* : ASUSTeK COMPUTER INC.
2. *System model* : K46CB
3. *Rating* : 4.9 Windows Experience Index
4. *Processor* : Intel(R) Core(TM) i3-3217U
CPU @ 1.80GHz 1.80GHz
5. *Installed memory* : 4,00 GB (3,89 GB usable)
6. *Operating system* : Windows 7 Home Premium 64-bit
7. *Product ID* :00359-OEM-8783763-96711

4.1. Perhitungan *Critical Clearing Time (CCT)* pada Sistem 2 Generator-9 Bus Terhubung Bus *Infinite*

Dalam membuktikan metode ini, maka dilakukan simulasi dengan menggunakan sistem IEEE 3 generator 9 bus, dimana generator 1 menjadi referensi *infinite bus* sehingga sistem ini hanya menggunakan 2 generator. Pada simulasi ini generator 1 sebagai *infinite bus* diberi momen inersia dengan nilai sangat besar (9999). *Single line diagram* dari sistem tersebut ditunjukkan pada gambar 4.1



Gambar 4.1. *Single line diagram* sistem IEEE 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite*

Dari sistem pada gambar 4.1 telah ditentukan letak titik-titik dimana gangguan terjadi. Diasumsikan terdapat 9 titik gangguan pada sistem. Letak titik-titik gangguan tersebut adalah:

- A : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7, dekat bus 2
- B : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9, dekat bus 3
- C : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 6, dekat bus 4
- E : titik gangguan antara bus 7 dan bus 5, dekat bus 7
- F : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7
- G : titik gangguan antara bus 9 dan bus 6, dekat bus 9
- H : titik gangguan antara bus 9 dan bus 8, dekat bus 9
- I : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9, dekat bus 6

Pada tabel 4.1 ditunjukkan spesifikasi data dari transmisi sistem 3 generator-9 bus. Pada tabel 4.2 menunjukkan spesifikasi data dari bus sistem 3 generator-9 bus.

Tabel 4.1. Data parameter saluran transmisi sistem IEEE 3 generator-9 bus

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (p.u)
1	1	4	0,000	0,0576	0,0000
2	2	7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3	9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4	5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4	6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5	7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6	9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7	8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 4.2. Data bus sistem IEEE 3 generator-9 bus

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	163	0,00	0,00	0,00
3	85,0	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	125	50,0
6	0,00	0,00	90,0	30,0
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	100	35,0
9	0,00	0,00	0,00	0,00

4.1.1. Penentuan Parameter Awal untuk Sistem IEEE 2 Generator-9 Bus Terhubung Bus *Infinite*.

Setelah menentukan titik gangguan, maka selanjutnya akan dicari aliran daya dari sistem tersebut. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan parameter awal yang diperlukan pada proses iterasi selanjutnya. Tabel 4.3 menunjukkan parameter-parameter yang diperlukan dari hasil iterasi aliran daya untuk sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite*. Parameter tersebut antara lain :

1. Daya mekanis generator (Pm)
2. Tegangan bus generator (V)
3. Daya total generator (S)
4. Tegangan generator (Ea)

Tabel 4.3. Parameter yang diperlukan dari hasil iterasi aliran daya untuk sistem IEEE 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite*

Gen	P.m (p.u)	V (p.u)	S (p.u)	Ea (p.u)
2	1,6300	1,6300+0,0665j	1,6300+0,0665j	0,9885+0.3546j
3	0,8500	0,8500-0,1086j	0,8500-0,1086j	0,9902+0.2316j

Setelah mendapatkan parameter-parameter pada tabel 4.3 maka dapat ditentukan nilai daya elektrik generator (Pe) di tiap titik gangguan. Tabel 4.4 menunjukkan nilai Pe di tiap titik gangguan dari sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite* tanpa *damping*. Tabel 4.5 menunjukkan nilai Pe di tiap titik gangguan dari sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite* dengan *damping*.

Tabel 4.4. Nilai Pe untuk tiap gangguan pada sistem IEEE 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite* tanpa *damping*

Pe (p.u)		
Gangguan	Generator 2	Generator 3
A	2,5604	1,5682
B	-0,7804	-0,7620
C	0,4418	0,0573
D	2,6391	1,4177
E	2,2588	0,9097
F	-2,0109	1,6671
G	-0,3911	2,4828
H	-2,1745	1,8060
I	-0,6510	0,2371

Tabel 4.5. Nilai P_e untuk tiap gangguan pada sistem IEEE 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite* dengan *damping*

P_e (p.u)		
Gangguan	Generator 2	Generator 3
A	-2,2955	1,7835
B	3,4569	-0,3881
C	-2,1631	2,0152
D	-0,0278	1,0540
E	1,5756	-0,3029
F	-2,5055	1,9341
G	-0,7213	2,1405
H	1,6599	0,1871
I	-0,2593	-0,5724

4.1.1.1. Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 2 Generator-9 Bus yang Terhubung Bus Infinite

Simulasi dilakukan dengan sistem tenaga listrik M. Anderson and A.A. Fouad 3 generator-9 bus dengan generator 1 menjadi bus *infinite*. *Single line diagram* dari sistem tersebut ditunjukkan pada gambar 4.1. Spesifikasi dari sistem ditunjukkan antara lain ditunjukkan pada tabel 4.1 untuk data saluran transmisi dan tabel 4.2 untuk data bus sistem.

Dengan menggunakan metode *critical trajectory*, besar nilai CCT dan nilai epsilon bergantung pada banyaknya titik m (titik antara *fault-on trajectory* dan *exit point*). Pada simulasi yang dilakukan menggunakan $m=10$.

4.1.1.2. CCT pada Sistem IEEE 2 Generator-9 Bus yang Terhubung Bus Infinite tanpa Damping

Simulasi pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite* ini mengabaikan *damping* yang terdapat pada setiap generator. Seperti yang terlihat pada tabel 4.6, nilai CCT yang dihasilkan oleh metode yang diusulkan telah dibandingkan dengan nilai CCT yang dihasilkan dengan *numerical simulation method*. Terlihat bahwa nilai hasil perhitungan CCT di setiap titik gangguan mendekati nilai CCT yang sebenarnya.

Tabel 4.6. Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan metode yang diusulkan dengan nilai *CCT* hasil perhitungan *numerical simulation method* pada sistem IEEE 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite* tanpa *damping*.

Fault Point	Open Line	Metode yang diusulkan		<i>numerical simulation method</i>		error
		CCT[s]	CPU[s]	CCT[s]	CPU[s]	
A	2-7	0,1822	1,3818	0,18-0,19	316,573	0
B	3-9	0,2380	1,3881	0,23-0,24	326,948	0
C	4-5	0,2525	1,4524	0,25-0,26	314,677	0
D	4-6	0,2560	1,6390	0,25-0,26	314,538	0
E	7-5	0,1989	1,4683	0,19-0,2	314,808	0
F	7-8	0,1994	1,4046	0,2-0,21	327,6	-0,3%
G	9-6	0,2362	1,5188	0,23-0,24	314,293	0
H	9-8	0,2390	1,4504	0,23-0,24	314,151	0
I	6-9	0,4168	1,2978	0,41-0,42	327,208	0
Rata-rata			1,4446		318,977	

Metode yang diusulkan termasuk metode langsung (*direct method*), karena nilai *CCT* yang dihasilkan dapat ditentukan secara langsung. Sedangkan *numerical simulation method* termasuk metode tidak langsung (*indirect method*), karena nilai *CCT* yang ditemukan berada dalam *range* waktu antara saat kondisi stabil dan kondisi tidak stabil setelah terjadi gangguan pada sistem. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik A diperoleh *CCT numerical simulation method* sebesar 0,18-0,19 detik. Hal ini berarti sistem masih berada dalam keadaan stabil saat waktu pemutusan gangguan di atas 0,18 detik, namun saat waktu pemutusan gangguan di atas 0,19 detik maka sistem berada dalam keadaan tidak stabil. Sehingga waktu antara 0,18-0,19 detik merupakan *critical clearing time (CCT)*.

Waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai *CCT* dari kedua metode berbeda. Untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil dari *numerical simulation method* adalah dengan *trial and error* untuk setiap titik gangguannya. Diasumsikan bahwa untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil dibutuhkan 10 kali percobaan dimana masing-masing percobaannya diasumsikan butuh waktu 30 detik ditambah waktu proses *running* programnya. Sehingga dapat dirumuskan waktu (CPU) untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil adalah sebagai berikut:

$$CPU [s] = 10 \times (30 + Waktu\ running\ program)$$

Sedangkan untuk menentukan waktu (CPU) dengan metode yang diusulkan didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

Nilai *error* adalah perbandingan antara nilai *CCT* dari metode yang diusulkan berada di antara batas nilai waktu keadaan stabil (*tcs*) dan nilai waktu keadaan tidak stabil (*tcu*) dari *numerical simulation method*. Dapat dirumuskan untuk mendapatkan nilai *error* adalah sebagai berikut:

$$error = \frac{\text{nilai } cct - tcu \text{ atau } tcs}{tcu \text{ atau } tcs}$$

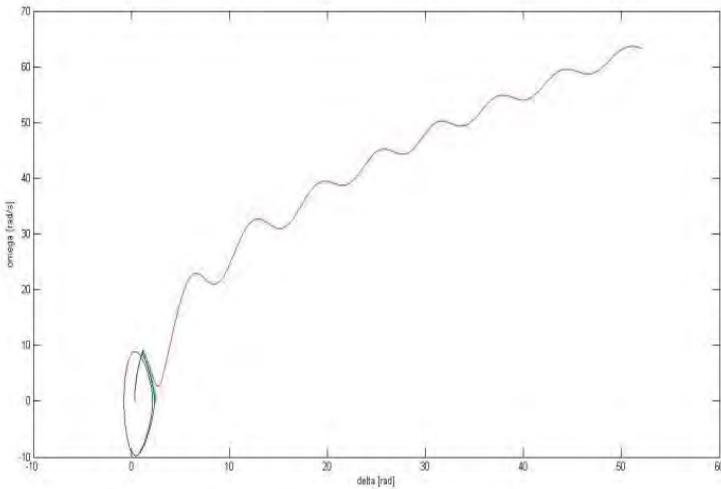
Nilai *error* yang didapatkan adalah 0% untuk semua titik gangguan kecuali titik gangguan F yakni -0,3% . Pada seluruh titik gangguan selain titik F memiliki nilai *CCT* yang berada di antara batas waktu stabil dan batas waktu tidak stabil, sementara itu pada titik gangguan F nilai *CCT* didapatkan 0,1994 detik dengan batas waktu stabil dan tidak stabil saat gangguan di titik F adalah 0,2-0,21 detik. Sehingga nilai *CCT* pada titik gangguan F berada di bawah batas waktu stabil dan tidak stabil, dan sistem masih dalam keadaan stabil pada *CCT* tersebut.

4.1.1.3. Analisis Grafik Karakteristik Sistem IEEE 2 generator-9 bus yang Terhubung ke Bus Infinite tanpa Damping

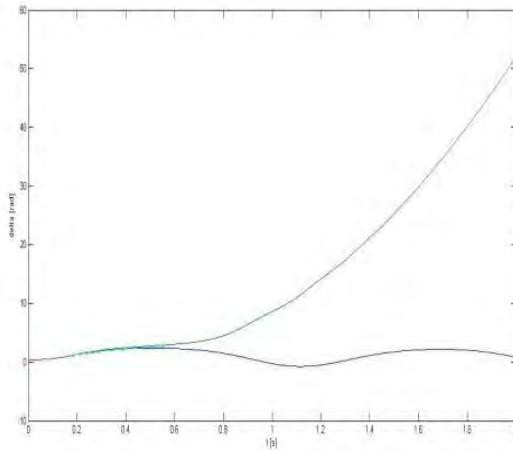
Pada gambar grafik karakteristik 4.2 – 4.19 di bawah ini terlihat perbedaan antara kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem yang diwakili oleh generator kritis. Pada karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ), kurva berwarna “merah” menunjukkan kurva kondisi tidak stabil dimana waktu pemutusan gangguan melebihi batas bawah *CCT* yang telah didapatkan dari *numerical simulation method* seperti pada tabel 4.5. Kurva berwarna “biru” menunjukkan kurva kondisi stabil dimana pemutusan gangguan kurang atau lebih dari batas bawah *CCT* yang telah didapatkan dari *numerical simulation method* seperti pada tabel 4.5. Kurva berwarna “hijau” merupakan *trajectory* kritis hasil dari metode yang diusulkan sehingga didapatkan nilai *CCT*. Berikut adalah hasil simulasi dengan menggunakan *trajectory* kritis pada setiap titik gangguan dimulai dari gangguan di titik A hingga titik I pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung pada bus *infinite* tanpa damping.

a. Titik Gangguan A

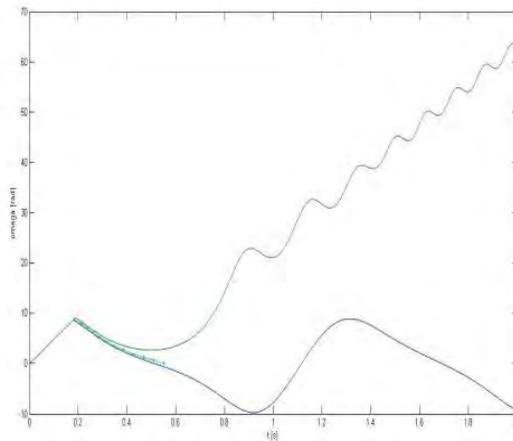
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,1822 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan pada saat 0,18 di antara 0,19 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.2. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

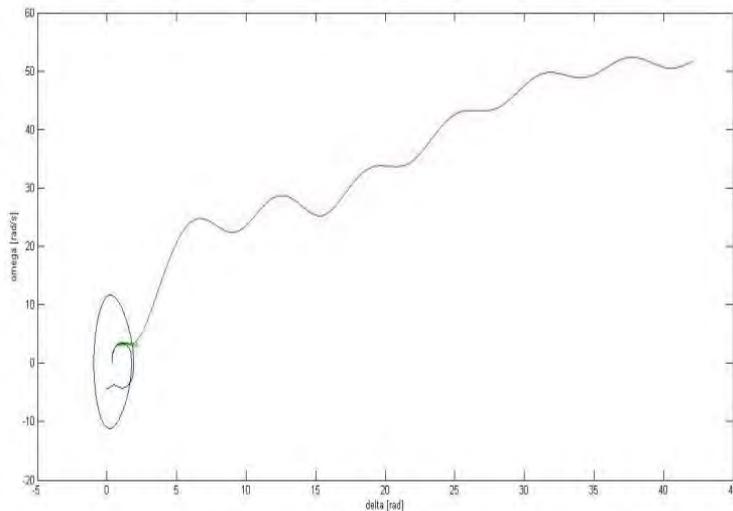


(b)

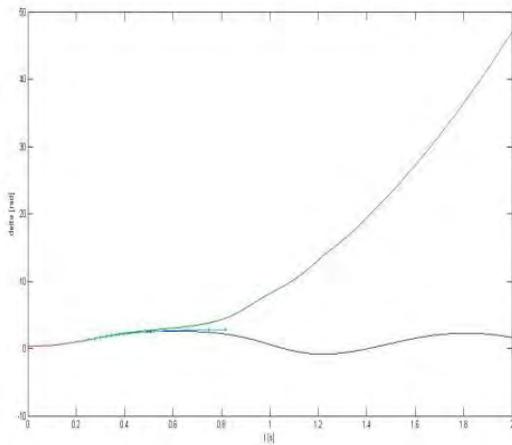
Gambar 4.3. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

b. Titik Gangguan B

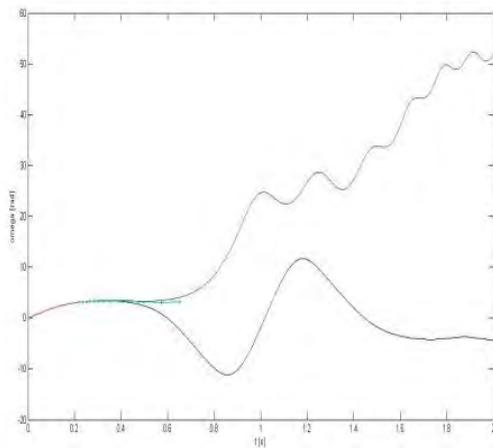
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,2380 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,23 dan 0,24 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.4. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan B pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

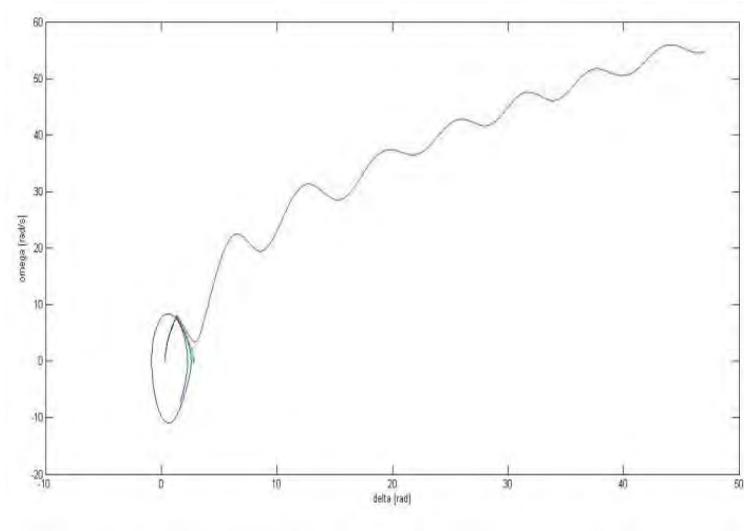


(b)

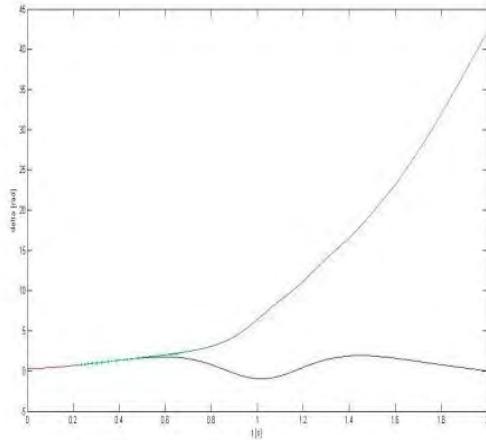
Gambar 4.5. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

c. Titik Gangguan C

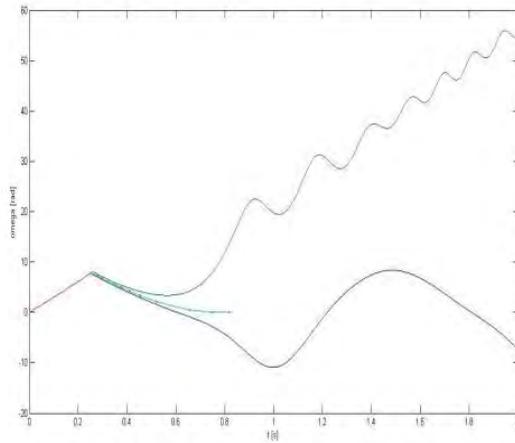
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,2525 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,25 dan 0,26 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.6. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

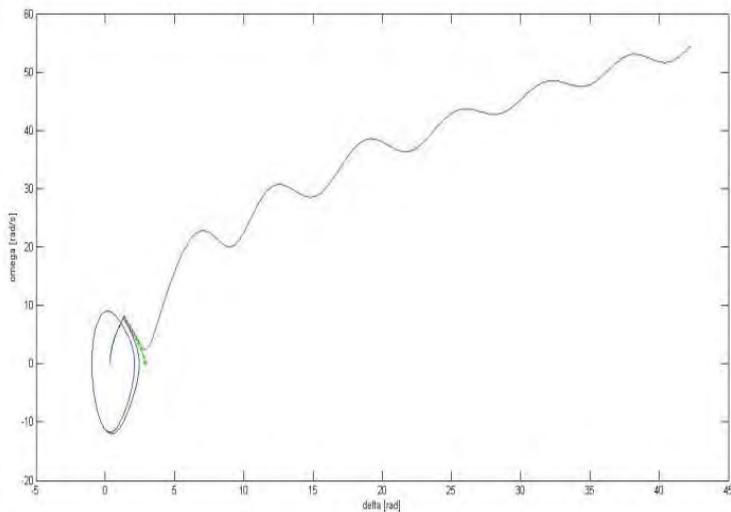


(b)

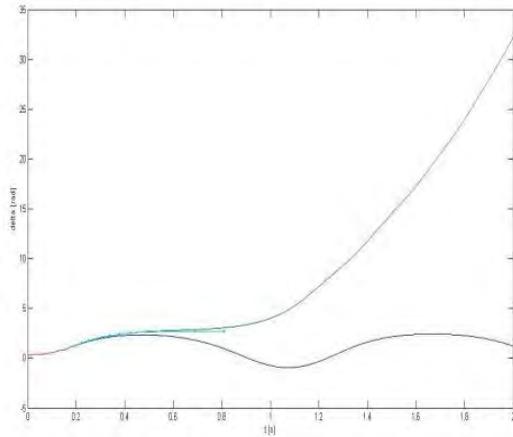
Gambar 4.7. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

d. Titik Gangguan D

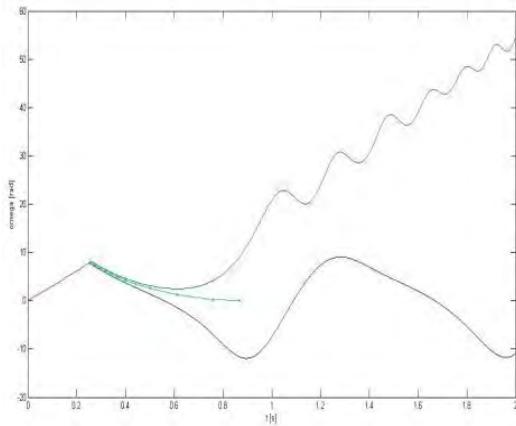
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,2560 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,25 dan 0,26 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.8. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan D pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

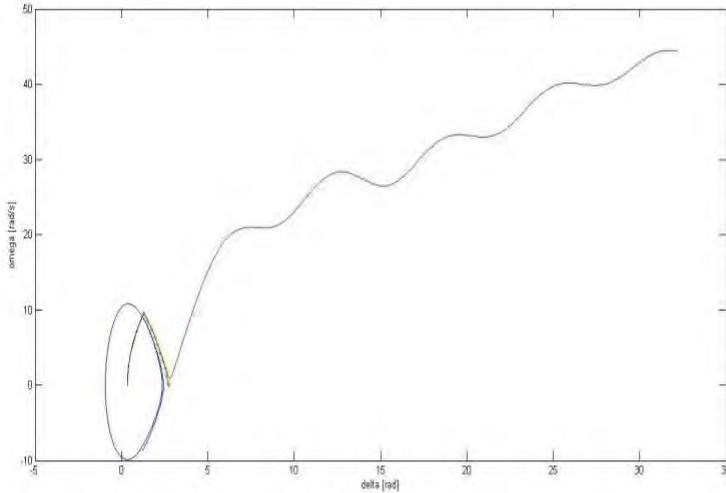


(b)

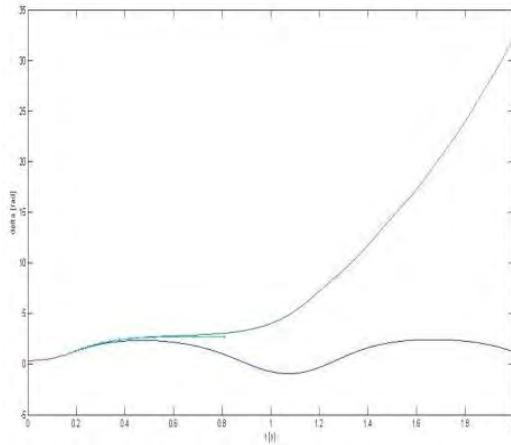
Gambar 4.9. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

e. Titik Gangguan E

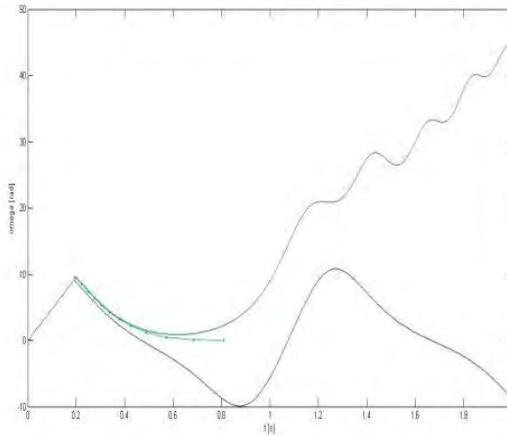
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,1989 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,19 dan 0,20 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.10. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan E pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

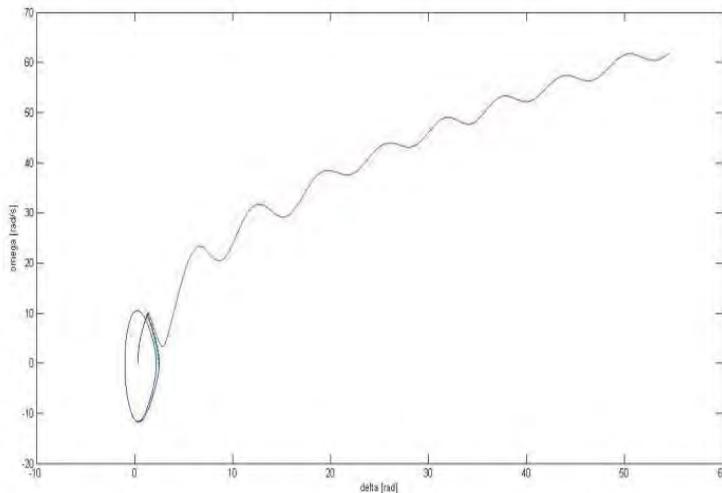


(b)

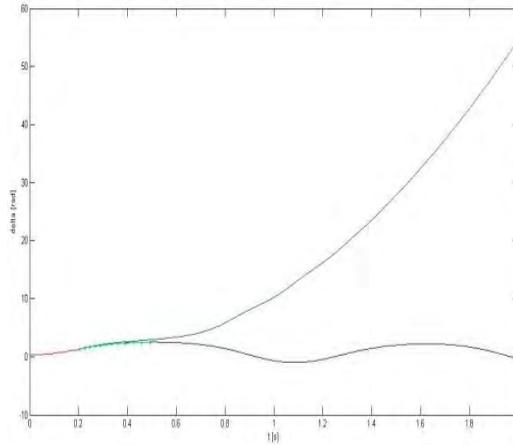
Gambar 4.11. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

f. Titik Gangguan F

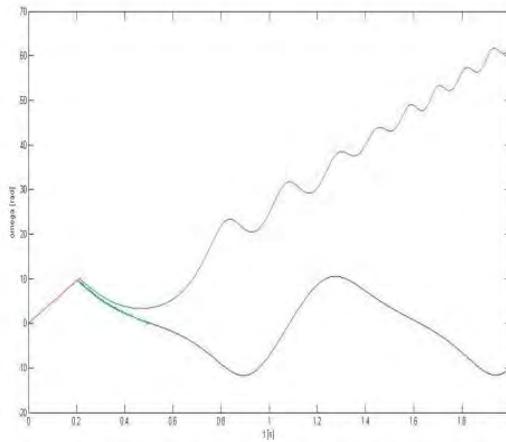
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,1994 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,20 dan 0,21 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.12. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan F pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

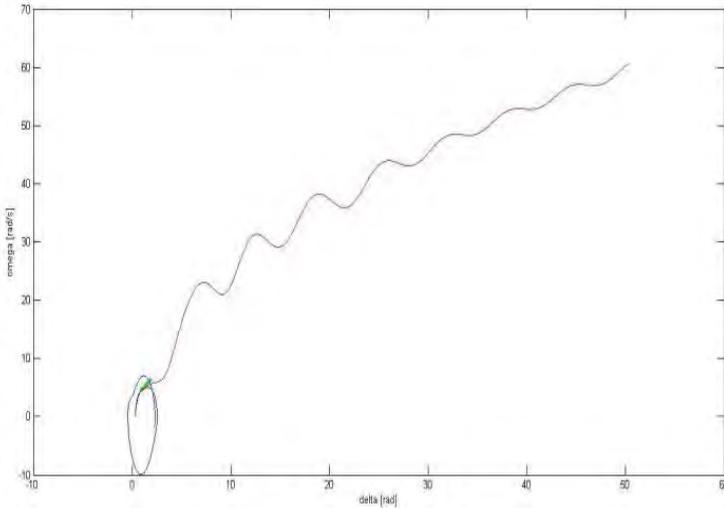


(b)

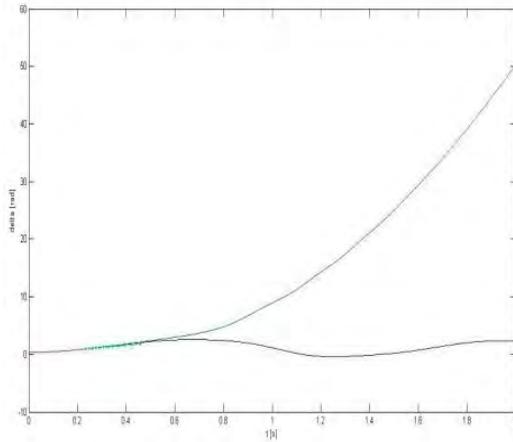
Gambar 4.13. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

g. Titik Gangguan G

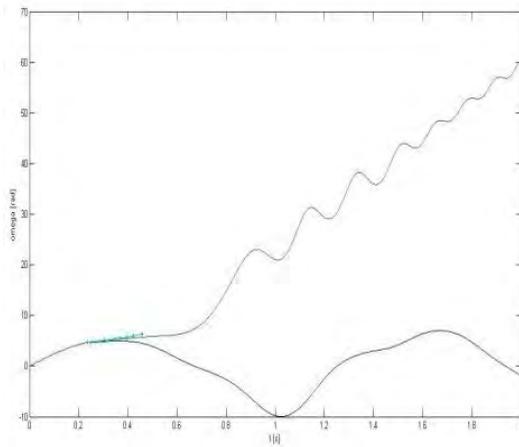
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,2362 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,23 dan 0,24 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.14. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan G pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

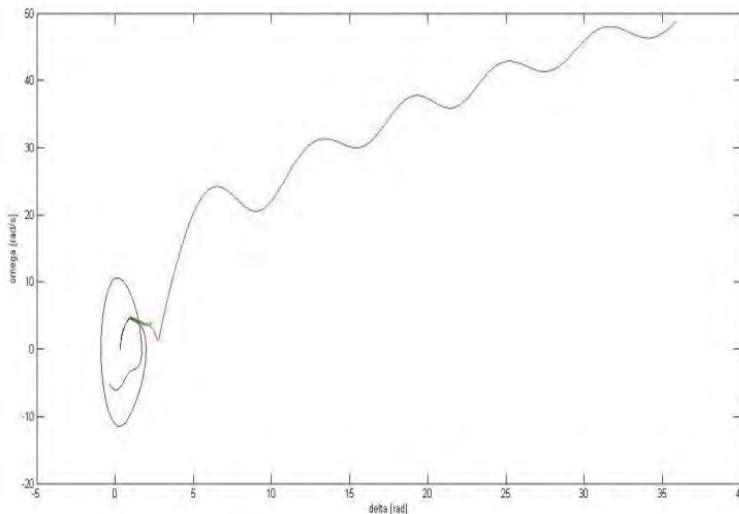


(b)

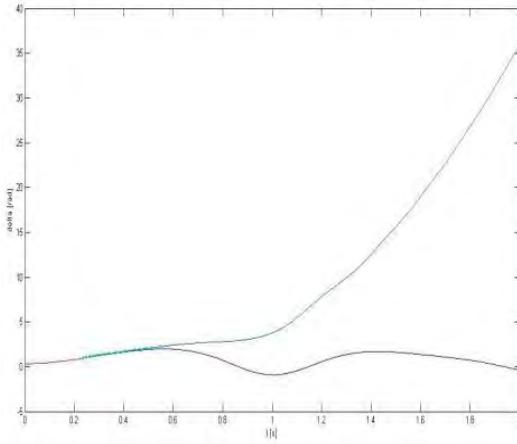
Gambar 4.15. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

h. Titik Gangguan H

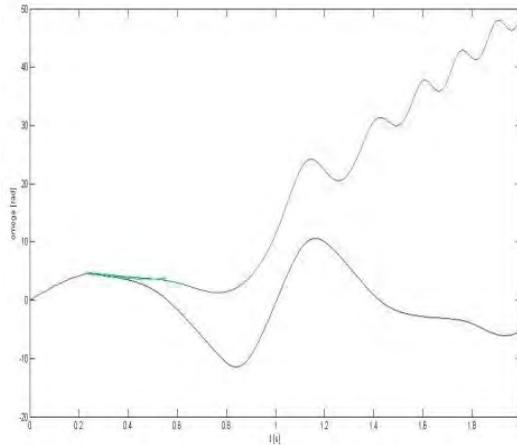
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,2390 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,23 dan 0,24 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.16. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

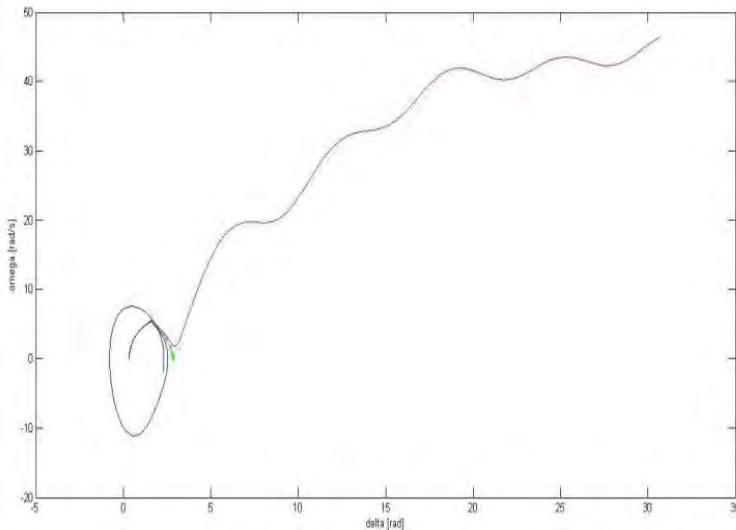


(b)

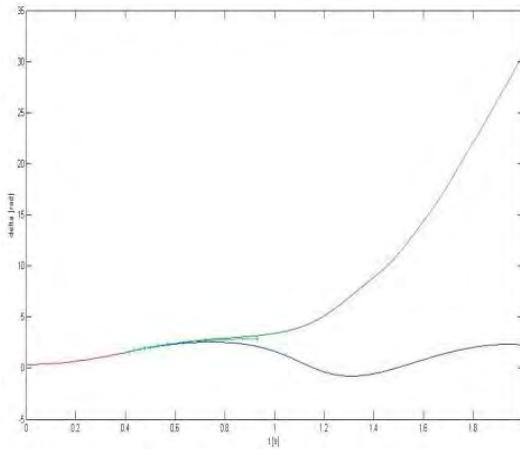
Gambar 4.17. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

i. Titik Gangguan I

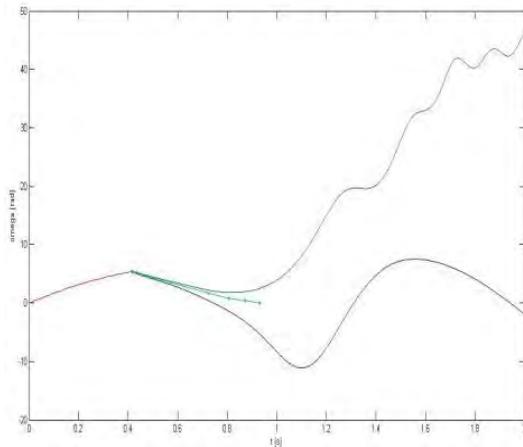
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,4168 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,41 dan 0,42 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.18. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)



(b)

Gambar 4.19. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

Pada gambar 4.2 – 4.19 dapat terlihat perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil. Saat gangguan diputus kurang atau di antara waktu stabil dan tidak stabil maka sesuai *stable trajectory*, sudut rotor dan kecepatan sudut rotor akan kembali berosilasi menuju kestabilan. Sementara itu saat gangguan diputus lebih dari waktu tidak stabil maka sesuai *unstable trajectory*, sudut rotor dan kecepatan sudut rotor akan keluar dari batas kestabilan.

4.1.2. Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem IEEE 2 Generator-9 Bus yang Terhubung Bus Infinite dengan Damping

Simulasi sistem 2 generator- 9 bus yang terhubung bus *infinite* dengan *damping*, konstanta *damping* yang digunakan sebesar 5%. Seperti yang terlihat pada tabel 4.7, nilai *CCT* yang dihasilkan dibandingkan dengan nilai *CCT* yang dihasilkan dengan *numerical simulation method*. Terlihat bahwa nilai hasil perhitungan *CCT* pada sistem yang terhubung bus *infinite* dengan *damping* mendekati nilai *CCT* yang sebenarnya.

Tabel 4.7. Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan metode yang diusulkan dengan nilai *CCT* hasil perhitungan *numerical simulation method* pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung bus *infinite* dengan *damping*

Fault Point	Open Line	Metode yang diusulkan		<i>numerical simulation method</i>		error
		CCT[s]	CPU[s]	CCT[s]	CPU[s]	
A	2-7	0,2197	1,3882	0,22-0,23	312,018	-0,136%
B	3-9	0,3174	1,7368	0,31-0,32	311,713	
C	4-5	0,3182	1,6060	0,31-0,32	311,706	0
D	4-6	0,3223	1,3903	0,32-0,33	311,780	0
E	7-5	0,2404	1,4650	0,24-0,25	312,019	0
F	7-8	0,2394	1,4710	0,24-0,25	312,152	-0,25%
G	9-6	0,3237	1,3687	0,31-0,32	312,522	1,156%
H	9-8	0,3199	1,6012	0,31-0,32	312,204	0
I	6-9	0,3574	1,3210	0,61-0,62	311,865	0
Rata-rata			1,4826		311,998	

Metode yang diusulkan termasuk metode langsung (*direct method*), karena nilai *CCT* yang dihasilkan dapat ditentukan secara langsung. Sedangkan *numerical simulation method* termasuk metode tidak

langsung (*indirect method*), karena nilai *CCT* yang ditemukan berada dalam *range* waktu antara saat kondisi stabil dan kondisi tidak stabil setelah terjadi gangguan pada sistem. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik A diperoleh *CCT numerical simulation method* sebesar 0,22-0,23 detik. Hal ini berarti sistem masih berada dalam keadaan stabil saat waktu pemutusan gangguan di atas 0,22 detik, namun saat waktu pemutusan gangguan di atas 0,23 detik maka sistem berada dalam keadaan tidak stabil. Sehingga waktu antara 0,22-0,23 detik merupakan *critical clearing time (CCT)*.

Waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai *CCT* dari kedua metode berbeda. Untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil dari *numerical simulation method* adalah dengan *trial and error* untuk setiap titik gangguannya. Diasumsikan bahwa untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil dibutuhkan 10 kali percobaan dimana masing-masing percobaannya diasumsikan butuh waktu 30 detik ditambah waktu proses *running* programnya. Sehingga dapat dirumuskan waktu (CPU) untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil adalah sebagai berikut:

$$CPU [s] = 10 \times (30 + Waktu \text{ running program})$$

Sedangkan untuk menentukan waktu (CPU) dengan metode yang diusulkan didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

Nilai *error* adalah perbandingan antara nilai *CCT* dari metode yang diusulkan berada di antara batas nilai waktu keadaan stabil (*tcs*) dan nilai waktu keadaan tidak stabil (*tcu*) dari *numerical simulation method*. Dapat dirumuskan untuk mendapatkan nilai *error* adalah sebagai berikut:

$$error = \frac{\text{nilai } cct - tcu \text{ atau } tcs}{tcu \text{ atau } tcs}$$

Pada beberapa titik gangguan terdapat *error* antara nilai *CCT* dengan batas waktu stabil dan waktu tidak stabil. Nilai *error* yang didapatkan pada titik gangguan A sebesar -0,136%, titik gangguan F sebesar -0,25%, dan titik gangguan G sebesar 1,156%. Pada nilai *error* bernilai minus (-) berarti nilai *CCT* berada di bawah batas waktu stabil, sebagai contoh pada titik gangguan A nilai *CCT* adalah 0,2197 detik dengan batas waktu stabil dan tidak stabil saat gangguan di titik A adalah 0,22-0,23 detik. Sehingga nilai *CCT* pada titik gangguan F berada

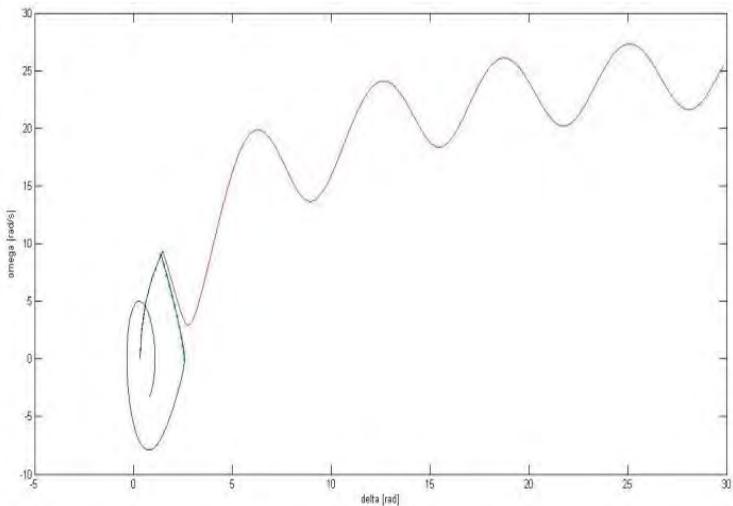
di bawah batas waktu stabil dan tidak stabil, dan sistem masih dalam keadaan stabil pada *CCT* tersebut. Pada nilai *error* bernilai positif (+) berarti nilai *CCT* berada di atas batas waktu tidak stabil, sebagai contoh pada titik gangguan G nilai *CCT* adalah 0,3237 detik dengan batas waktu stabil dan tidak stabil saat gangguan di titik G adalah 0,31-0,32 detik.

4.1.2.1. Analisis Grafik Karakteristik Sistem IEEE 2 generator-9 bus yang Terhubung ke Bus Infinite dengan Damping

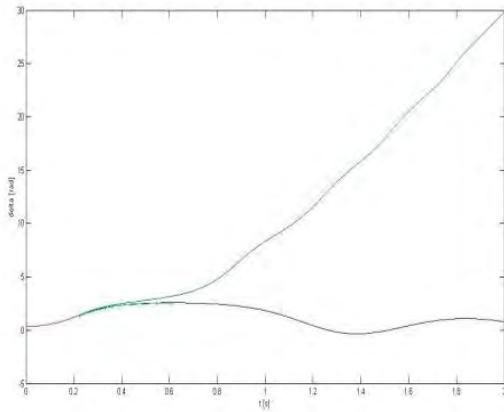
Pada gambar grafik karakteristik 4.20 – 4.37 di bawah ini terlihat perbedaan antara kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem yang diwakili oleh generator kritis. Pada karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ), kurva berwarna “merah” menunjukkan kurva kondisi tidak stabil dimana waktu pemutusan gangguan melebihi batas bawah *CCT* yang telah didapatkan dari *numerical simulation method* seperti pada tabel 4.6. Kurva berwarna “biru” menunjukkan kurva kondisi stabil dimana pemutusan gangguan kurang atau lebih dari batas bawah *CCT* yang telah didapatkan dari *numerical simulation method* seperti pada tabel 4.6. Kurva berwarna “hijau” merupakan *trajectory* kritis hasil dari metode yang diusulkan sehingga didapatkan nilai *CCT*. Berikut adalah hasil simulasi dengan menggunakan *trajectory* kritis pada setiap titik gangguan dimulai dari gangguan di titik A hingga titik I pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung pada bus *infinite* dengan damping.

a. Titik Gangguan A

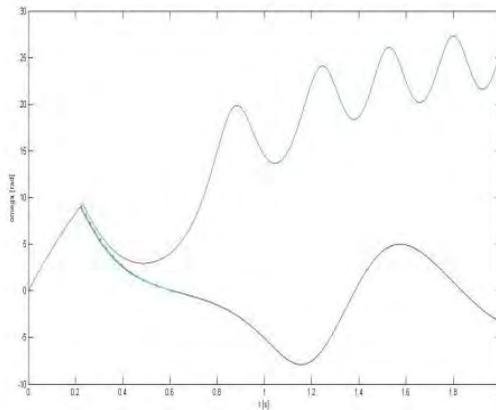
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,2197 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan pada saat 0,22 di antara 0,23 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.20. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

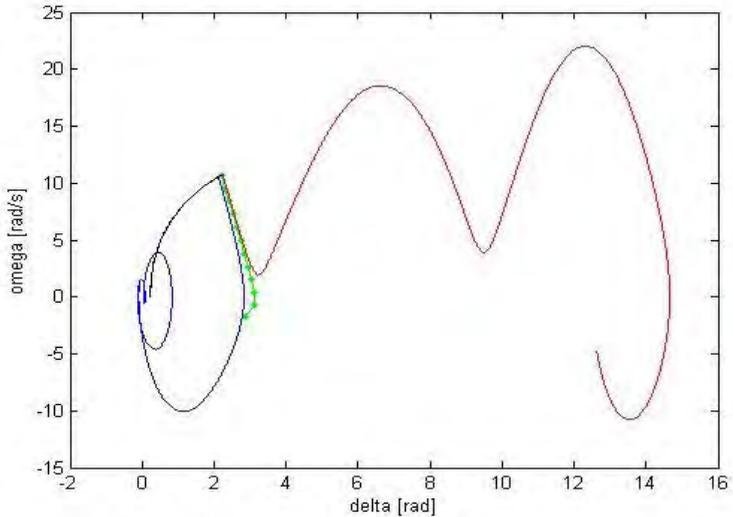


(b)

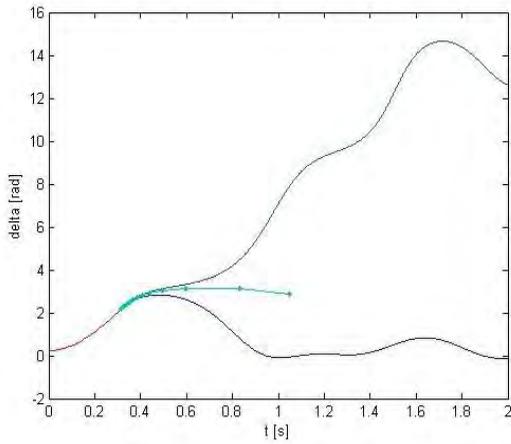
Gambar 4.21. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

b. Titik Gangguan B

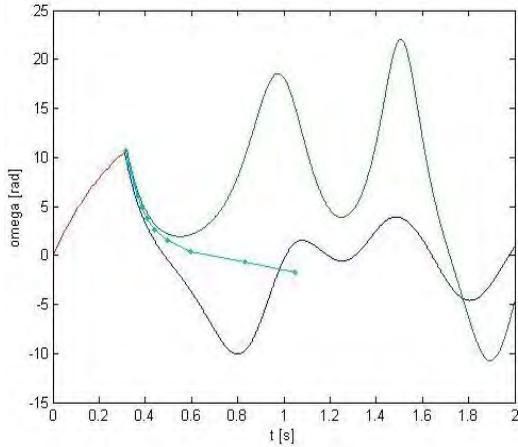
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,3174 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,31 dan 0,32 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.22. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan B pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

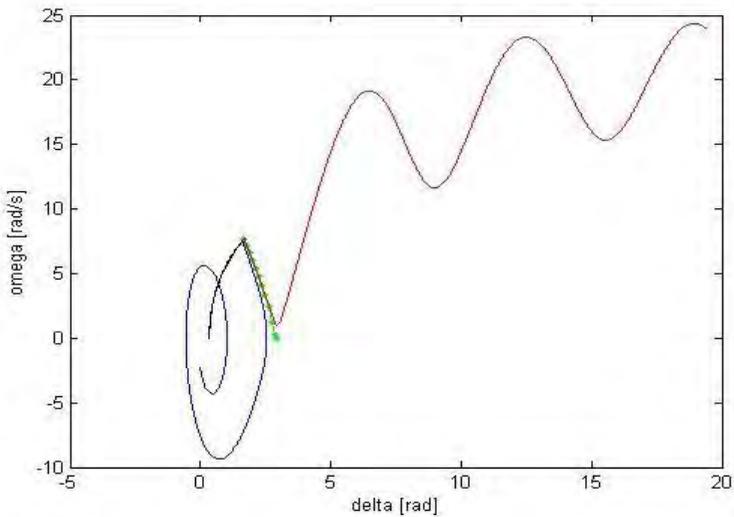


(b)

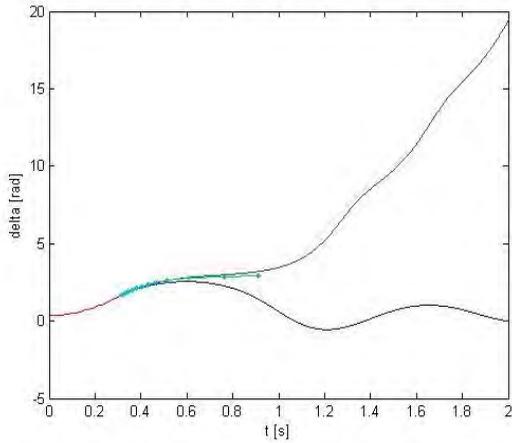
Gambar 4.23. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

c. Titik Gangguan C

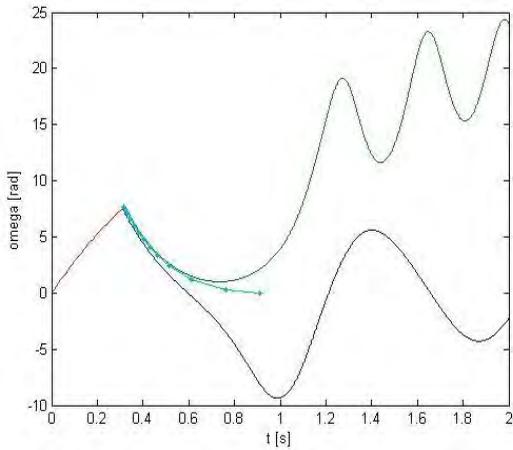
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,3182 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,31 dan 0,32 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.24. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

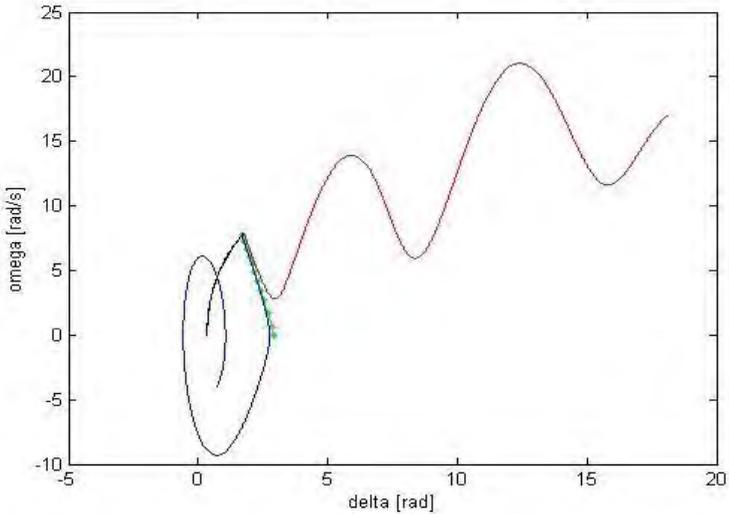


(b)

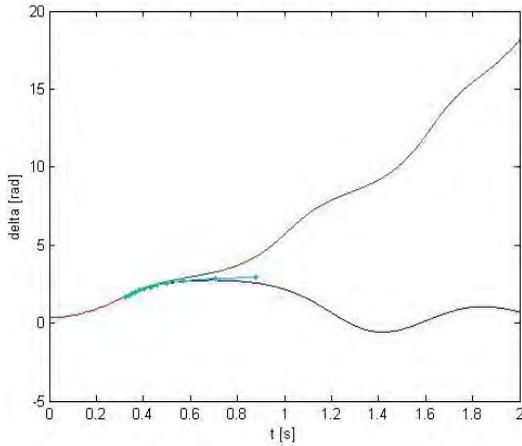
Gambar 4.25. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

d. Titik Gangguan D

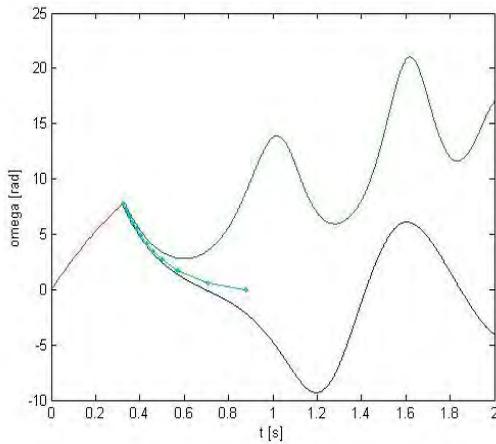
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,3223 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,32 dan 0,33 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.26. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan D pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

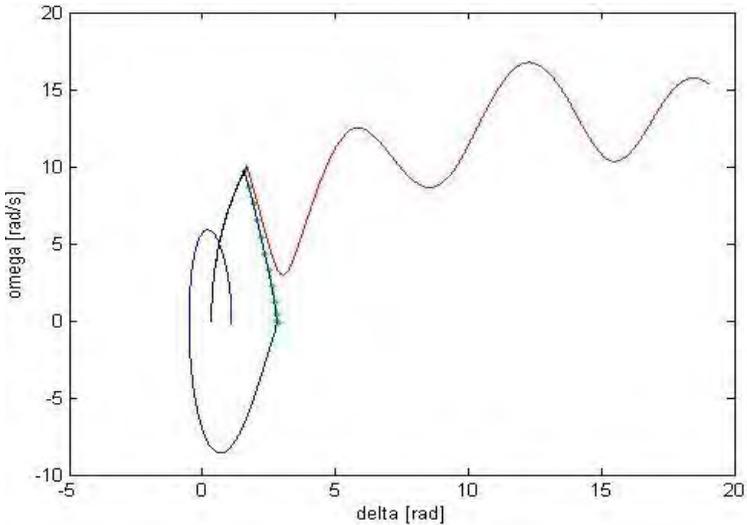


(b)

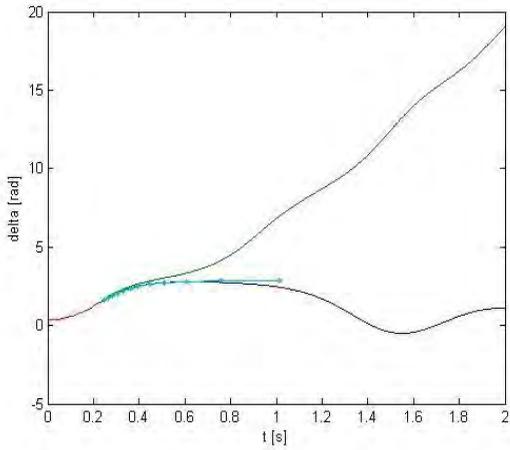
Gambar 4.27. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

e. Titik Gangguan E

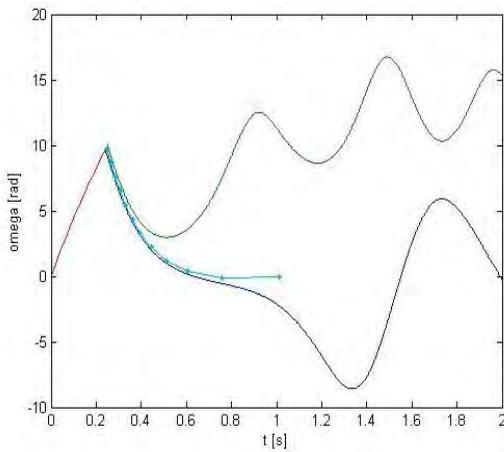
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,2404 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,24 dan 0,25 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.28. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan E pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

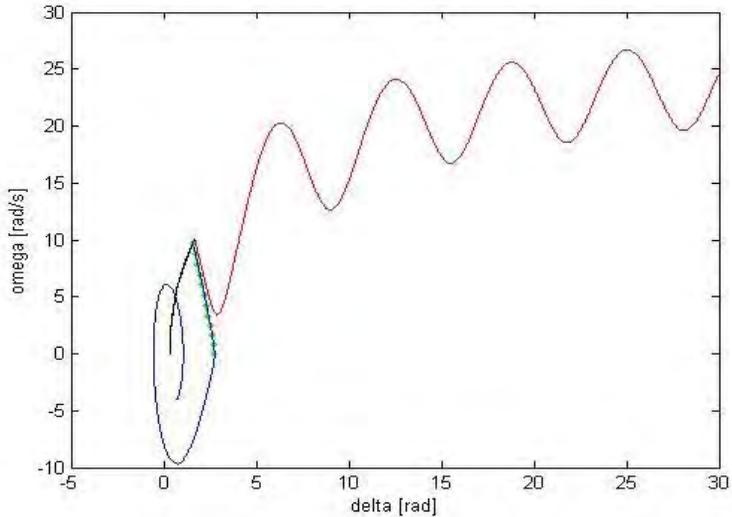


(b)

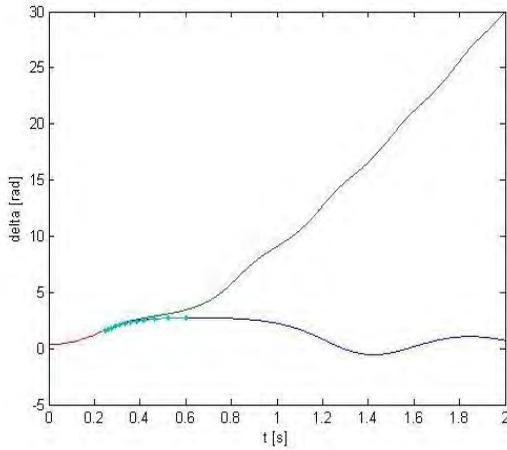
Gambar 4.29. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

f. Titik Gangguan F

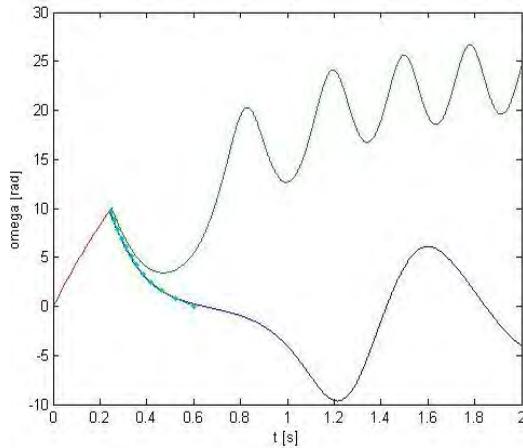
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,2394 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,24 dan 0,25 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.30. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan F pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

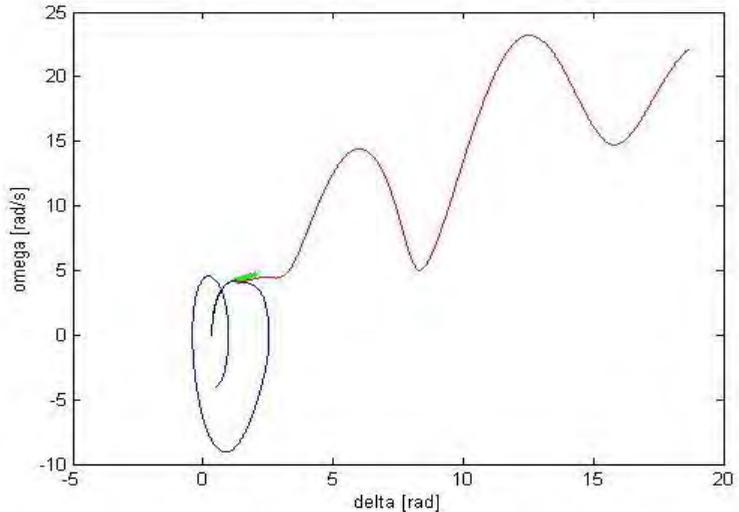


(b)

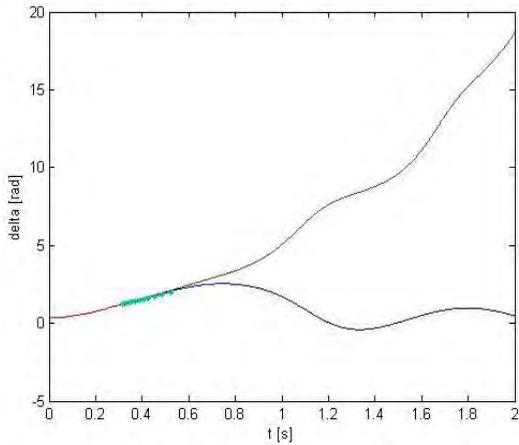
Gambar 4.31. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

g. Titik Gangguan G

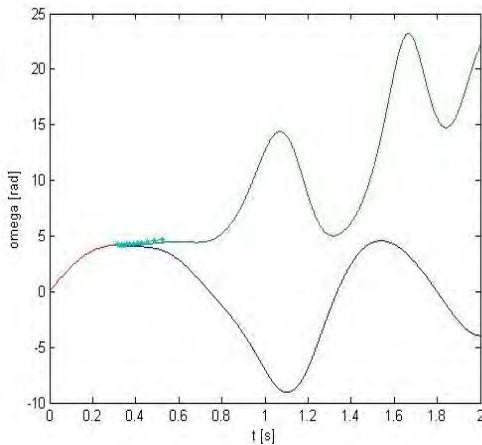
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,3237 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,31 dan 0,32 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.32. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan G pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

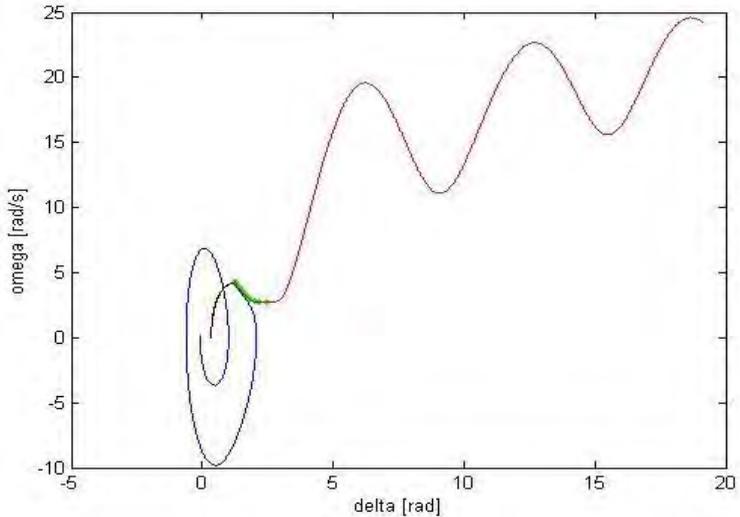


(b)

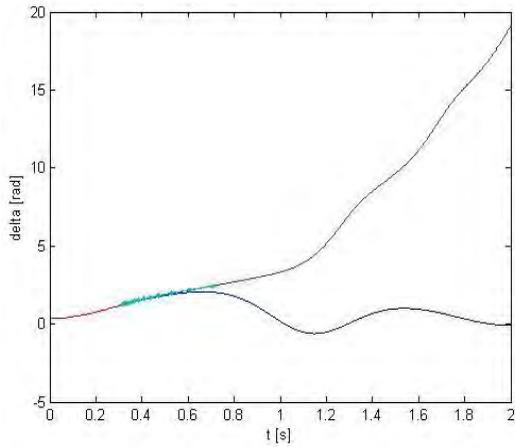
Gambar 4.33. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

h. Titik Gangguan H

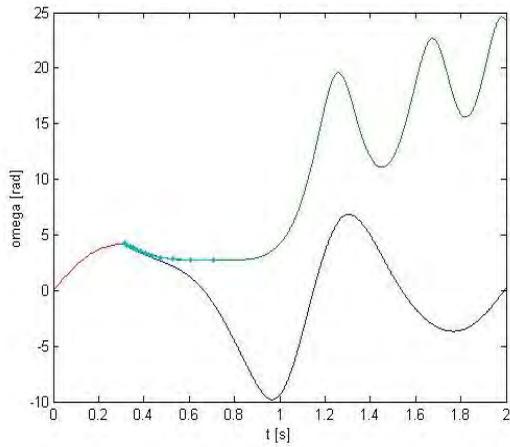
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,3199 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,31 dan 0,32 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.34. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

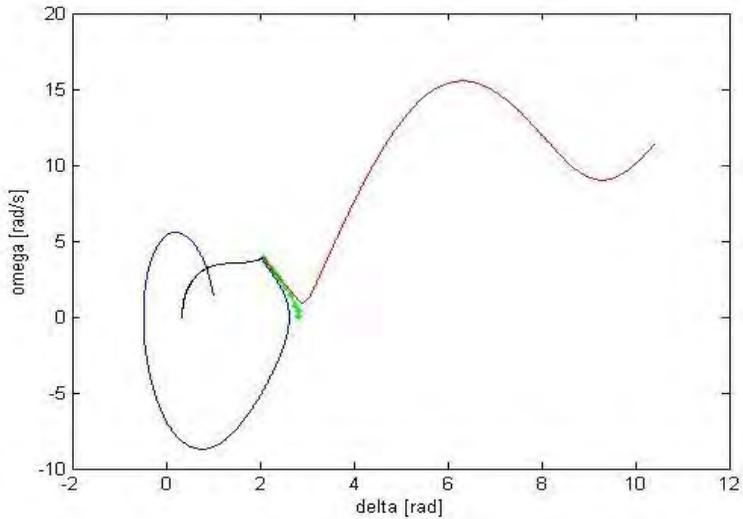


(b)

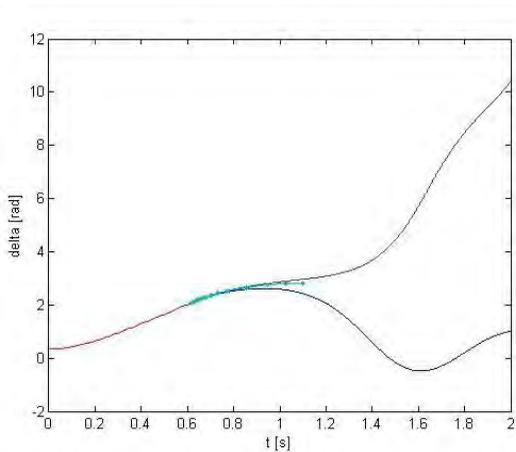
Gambar 4.35. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

i. Titik Gangguan I

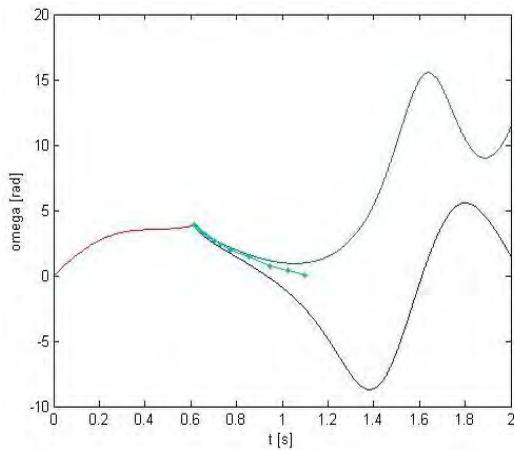
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,6175 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,61 dan 0,62 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*.



Gambar 4.36. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 2 generator-9 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)



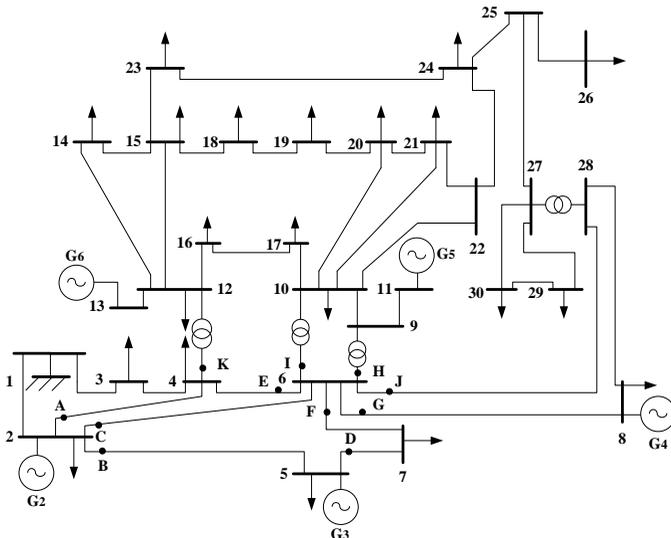
(b)

Gambar 4.37. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 2 generator-9 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

Pada gambar 4.20 – 4.37 dapat terlihat perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil. Saat gangguan diputus kurang atau di antara waktu stabil dan tidak stabil maka sesuai *stable trajectory*, sudut rotor dan kecepatan sudut rotor akan kembali beresilasi menuju kestabilan. Sementara itu saat gangguan diputus lebih dari waktu tidak stabil maka sesuai *unstable trajectory*, sudut rotor dan kecepatan sudut rotor akan keluar dari batas kestabilan

4.2. Perhitungan CCT pada Sistem IEEE 5 Generator-30 Bus Terhubung Bus *Infinite*.

Dalam membuktikan keakuratan metode ini, maka dilakukan simulasi dengan menggunakan sistem IEEE 6 generator 9 bus, dimana generator 1 menjadi referensi *infinite bus* sehingga sistem ini hanya menggunakan 2 generator. Pada simulasi ini generator 1 sebagai *infinite bus* diberi momen inersia dengan nilai sangat besar (9999). *Single line diagram* dari sistem tersebut ditunjukkan pada gambar 4.38.



Gambar 4.38. *single line diagram* sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus *infinite*

Dari sistem pada gambar 4.38 telah ditentukan letak titik-titik dimana gangguan terjadi. Diasumsikan terdapat 11 titik gangguan pada sistem. Letak titik-titik gangguan tersebut adalah:

- A : titik gangguan antara bus 2 dan bus 4, dekat bus 2
- B : titik gangguan antara bus 2 dan bus 5, dekat bus 2
- C : titik gangguan antara bus 2 dan bus 6, dekat bus 2
- D : titik gangguan antara bus 5 dan bus 7, dekat bus 5
- E : titik gangguan antara bus 6 dan bus 4, dekat bus 6
- F : titik gangguan antara bus 6 dan bus 7, dekat bus 6
- G : titik gangguan antara bus 6 dan bus 8, dekat bus 6
- H : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9, dekat bus 6
- I : titik gangguan antara bus 6 dan bus 10, dekat bus 6
- J : titik gangguan antara bus 6 dan bus 28, dekat bus 6
- K : titik gangguan antara bus 4 dan bus 12, dekat bus 4

Pada tabel 4.7 menunjukkan spesifikasi data dari transmisi sistem 6 generator-30 bus. Pada tabel 4.8 menunjukkan spesifikasi data dari bus sistem 6 generator-30 bus.

Tabel 4.8. Data parameter saluran transmisi sistem IEEE 6 generator-30 bus

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)	Tap Setting
1	1	2	0,0192	0,0575	0,0264	
2	1	3	0,0452	0,1852	0,0204	
3	2	4	0,0570	0,1737	0,0184	
4	3	4	0,0132	0,0379	0,0042	
5	2	5	0,0472	0,1983	0,0209	
6	2	6	0,0581	0,1763	0,0187	
7	4	6	0,0119	0,0414	0,0045	
8	5	7	0,046	0,116	0,0102	
9	6	7	0,0267	0,0820	0,0085	

Lanjutan Tabel 4.8. Data Transmisi Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus.

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)	Tap Setting
10	6	8	0,012	0,0420	0,0045	
11	6	9	0	0,2080	0	0,9780
12	6	10	0	0,5560	0	0,9690
13	9	11	0	0,2080	0	
14	4	12	0	0,2560	0	0,9320
15	12	13	0	0,1400	0	
16	12	14	0,1231	0,2559	0	
17	12	15	0,0662	0,1304	0	
18	12	16	0,0945	0,1987	0	
19	14	15	0,2210	0,1997	0	
20	16	17	0,0824	0,1932	0	
21	15	18	0,1070	0,2185	0	
22	18	19	0,0639	0,1292	0	
23	19	20	0,0340	0,0680	0	
24	10	20	0,0936	0,2090	0	
25	10	17	0,0324	0,0845	0	
26	10	21	0,0348	0,0749	0	
27	10	22	0,0727	0,1499	0	
28	21	22	0,0116	0,0236	0	
29	15	23	0,1000	0,2020	0	
30	22	24	0,1150	0,1790	0	
31	23	24	0,1320	0,2700	0	
32	24	25	0,1885	0,3292	0	
33	25	26	0,2544	0,3800	0	
34	25	27	0,1093	0,2087	0	

Lanjutan Tabel 4.8. Data Transmisi Sistem IEEE 6 Generator 30 Bus.

No. Line	Dari Bus	Menuju Bus	R	X	Half Line Charging Susceptance (pu)	Tap Setting
35	27	28	0	0,3960	0	0,9680
36	27	29	0,2198	0,4153	0	
37	27	30	0,3202	0,6027	0	
38	29	30	0,2399	0,4533	0	
39	8	28	0,0636	0,2000	0,0214	
40	6	28	0,0169	0,0599	0,0065	
41	9	10	0	0,1100	0	

Tabel 4.9. Data Bus Sistem IEEE 6 Generator 30-Bus.

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
1	0	0	0,00	0,00	
2	50	0	21,7	12,7	
3	0	0	2,40	1,20	
4	0	0	7,60	1,60	
5	105	0	94,2	19,0	
6	0	0	0,00	0,00	
7	0	0	22,8	10,9	
8	50	0	30,0	30,0	
9	0	0	0,00	0,00	
10	0	0	5,80	2,00	0,19
11	20	0	0,00	0,00	
12	0	0	11,2	7,50	
17	0	0	9,00	5,80	
18	0	0	3,20	0,90	

Lanjutan Tabel 4.9. Data Bus Sistem IEEE 6 Generator 30-Bus.

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)	Shunt Capacitor
19	0	0	9,50	3,40	
20	0	0	2,20	0,70	
21	0	0	17,5	11,2	
22	0	0	0,00	0,00	
23	0	0	3,20	1,60	
24	0	0	8,70	6,70	0,043
25	0	0	0,00	0,00	
26	0	0	3,5	2,3	
27	0	0	0,00	0,00	
28	0	0	0,00	0,00	
29	0	0	2,4	0,9	
30	0	0	10,6	1,9	

4.2.1. Penentuan Parameter Awal untuk Sistem IEEE 5 Generator-30 Bus yang Terhubung Bus *Infinite*.

Setelah menentukan titik gangguan, maka selanjutnya akan dicari aliran daya dari sistem tersebut. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan parameter awal yang diperlukan pada proses iterasi selanjutnya. Tabel 4.9 menunjukkan parameter-parameter yang diperlukan dari hasil iterasi aliran daya untuk sistem 5 generator 30-bus yang terhubung bus *infinite*. Parameter tersebut antara lain :

1. Daya mekanis generator (Pm)
2. Tegangan bus generator (V)
3. Daya semu generator (S)
4. Tegangan generator (Ea)

Tabel 4.10. Parameter yang diperlukan dari hasil iterasi aliran daya untuk sistem IEEE 5 generator-30 bus terhubung bus *infinite*.

Gen	P.m (p.u)	V (p.u)	S (p.u)	Ea (p.u)
2	0,4290	1,0450-0,0072j	0,2830+0,0727j	1,0615+0,0555j
3	0,6399	1,0099-0,0143j	0,1080-0,2127j	0,9614+0,0112j
4	0,7304	1,0096-0,0283j	0,2000-0,2030j	0,9756+0,0071j
5	0,4270	1,0816-0,0275j	0,2000+0,1482j	1,1063+0,004j
6	0,3247	1,0690-0,0651j	0,2000+0,0779j	1,0836-0,0335j

Setelah mendapatkan parameter-parameter pada tabel 4.9 maka dapat ditentukan nilai daya listrik generator (P_e) di tiap titik gangguan. Tabel 4.10 menunjukkan nilai P_e di tiap titik gangguan dari sistem 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite* tanpa *damping*. Tabel 4.11 menunjukkan nilai P_e di tiap titik gangguan dari sistem 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite* dengan *damping*.

Tabel 4.11. Nilai P_e untuk tiap gangguan pada sistem IEEE 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite* tanpa *damping*

P_e (p.u)					
Gangguan	G2	G3	G4	G5	G6
A	-1,5345	-0,2596	1,1039	3,1320	1.1540
B	4,7412	-2,2719	0,5055	2,1314	0,8292
C	-4,0426	-0,6984	1,0304	3,3119	1,1833
D	1,9372	2,0149	-1,4224	-3,4196	-2,2337
E	3,3175	4,4017	1,9596	2,2590	-5,0940
F	-2,3136	-3,4005	2,6914	-1,7316	3,8334
G	-2,6534	-3,8018	2,5936	4,7815	-3,3121
H	-3,4274	-4,0945	4,7227	3,9782	-1,9429
I	-0,6025	-1,1379	0,3709	-3,2613	4,9451
J	-0,0947	0,1916	-1,4692	2,2811	3,9939
K	-0,1946	0,9828	6,7082	-0,5737	-0,3403

Tabel 4.12. Nilai P_e untuk tiap gangguan pada sistem IEEE 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite* dengan *damping*

P_e (p.u)					
Gangguan	G2	G3	G4	G5	G6
A	-0,6439	2,1195	1,0814	0,5768	0,6630
B	-0,6510	1,9758	1,0418	0,5889	0,6378
C	-0,6669	2,0623	1,0448	0,5724	0,6564
D	0,3898	0,6757	0,8699	0,8641	0,5464
E	0,7175	0,6578	1,3194	1,3647	-0,0600
F	0,6222	0,5109	1,7973	0,7331	0,2363
G	0,5983	0,6948	0,5084	1,9376	0,1901
H	0,5961	0,6453	1,0543	1,6203	-0,0213
I	0,5942	0,6246	1,2464	1,4922	-0,0669
J	0,5946	0,6233	1,2448	1,4915	-0,0579
K	0,6154	0,3375	1,1443	0,0786	-0,2103

4.2.1.1. Perhitungan CCT pada sistem IEEE 5 generator-30 bus yang terhubung bus infinite

Simulasi dilakukan dengan sistem tenaga listrik M. Anderson and A.A. Fouad 6 generator-30 bus dengan generator 1 menjadi bus *infinite*. *Single line diagram* dari sistem tersebut ditunjukkan pada gambar 4.38. Spesifikasi dari sistem ditunjukkan antara lain ditunjukkan pada tabel 4.8 untuk data saluran transmisi dan tabel 4.9 untuk data bus sistem.

Dengan menggunakan metode *critical trajectory*, besar nilai CCT dan nilai epsilon bergantung pada banyaknya titik m (titik antara *fault-on trajectory* dan *exit point*) . Pada simulasi yang dilakukan menggunakan m=10.

4.2.1.2. Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem IEEE 5 Generator-30 Bus yang Terhubung Bus Infinite tanpa Damping

Simulasi pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite* ini mengabaikan *damping* yang terdapat pada setiap generator. Seperti yang terlihat pada tabel 4.12, nilai CCT yang dihasilkan oleh metode yang diusulkan telah dibandingkan dengan nilai CCT yang dihasilkan dengan *numerical simulation method*. Terlihat bahwa nilai hasil perhitungan CCT di setiap titik gangguan mendekati nilai CCT yang sebenarnya.

Tabel 4.13. Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan metode yang diusulkan dengan nilai CCT hasil perhitungan *numerical simulation method* pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite* tanpa *damping*

Fault Point	Open Line	Metode yang diusulkan		<i>numerical simulation method</i>		error
		CCT[s]	CPU[s]	CCT[s]	CPU[s]	
A	2-4	0,6912	2,8433	0,70-0,71	325,657	-1,26%
B	2-5	0,6958	2,7956	0,70-0,71	324,353	-0,6%
C	2-6	0,6918	1,6075	0,70-0,71	324,656	-1,17%
D	5-7	1,1035	3,0270	1,10-1,11	323,930	0
E	6-4	1,9923	2,7426	1,99-2,00	322,533	0
F	6-7	1,9939	3,5331	1,99-2,00	323,614	0
G	6-8	1,9962	2,9758	1,99-2,00	322,584	0
H	6-9	1,9958	2,8766	1,99-2,00	322,549	0
I	6-10	1,9945	2,9642	1,99-2,00	323,324	0
J	6-28	1,9942	3,0766	1,99-2,00	322,79	0
K	4-12	0,4632	1,5567	0,46-0,47	326,109	0
Rata-rata			2,7272		328,827	

Metode yang diusulkan termasuk metode langsung (*direct method*), karena nilai *CCT* yang dihasilkan dapat ditentukan secara langsung. Sedangkan *numerical simulation method* termasuk metode tidak langsung (*indirect method*), karena nilai *CCT* yang ditemukan berada dalam *range* waktu antara saat kondisi stabil dan kondisi tidak stabil setelah terjadi gangguan pada sistem. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik A diperoleh *CCT numerical simulation method* sebesar 0,70-0,71 detik. Hal ini berarti sistem masih berada dalam keadaan stabil saat waktu pemutusan gangguan di atas 0,70 detik, namun saat waktu pemutusan gangguan di atas 0,71 detik maka sistem berada dalam keadaan tidak stabil. Sehingga waktu antara 0,70-0,71 detik merupakan *critical clearing time (CCT)*.

Waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai *CCT* dari kedua metode berbeda. Untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil dari *numerical simulation method* adalah dengan *trial and error* untuk setiap titik gangguannya. Diasumsikan bahwa untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil dibutuhkan 10 kali percobaan dimana masing-masing percobaannya diasumsikan butuh waktu 30 detik ditambah waktu proses *running* programnya. Sehingga dapat dirumuskan waktu (CPU) untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil adalah sebagai berikut:

$$CPU [s] = 10 \times (30 + Waktu\ running\ program)$$

Sedangkan untuk menentukan waktu (CPU) dengan metode yang diusulkan didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

Nilai *error* adalah perbandingan antara nilai *CCT* dari metode yang diusulkan berada di antara batas nilai waktu keadaan stabil (*tcs*) dan nilai waktu keadaan tidak stabil (*tcu*) dari *numerical simulation method*. Dapat dirumuskan untuk mendapatkan nilai *error* adalah sebagai berikut:

$$error = \frac{nilai\ cct - tcu\ atau\ tcs}{tcu\ atau\ tcs}$$

Pada beberapa titik gangguan terdapat *error* antara nilai *CCT* dengan batas waktu stabil dan waktu tidak stabil. Nilai *error* yang didapatkan pada titik gangguan A sebesar -1,257%, titik gangguan B sebesar -0,6%, dan titik gangguan C sebesar -1,171%. Pada titik gangguan lain, nilai *CCT* berada dalam *range* batas waktu stabil dan

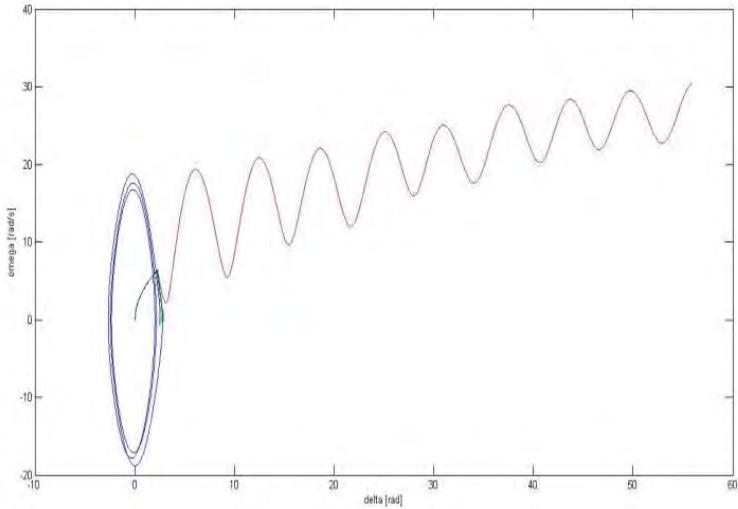
waktu tidak stabil sementara itu pada titik gangguan A, B, dan C nilai *CCT* berada di bawah batas waktu stabil, sebagai contoh pada titik gangguan A nilai *CCT* adalah 0,6918 detik dengan batas waktu stabil dan tidak stabil saat gangguan di titik A adalah 0,70-0,71 detik. Sehingga nilai *CCT* pada titik gangguan A berada di bawah batas waktu stabil dan tidak stabil, dan sistem masih dalam keadaan stabil pada *CCT* tersebut.

4.2.1.3. Analisis Grafik Karakteristik Sistem IEEE 5 generator-30 bus yang Terhubung ke Bus Infinite tanpa Damping

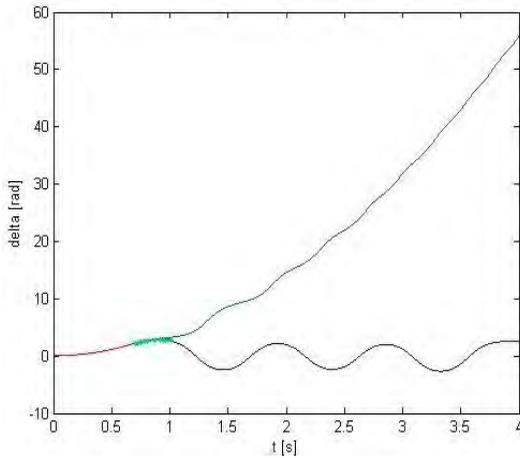
Pada gambar grafik karakteristik 4.39 – 4.60 di bawah ini terlihat perbedaan antara kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem yang diwakili oleh generator kritis. Pada karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ), kurva berwarna “merah” menunjukkan kurva kondisi tidak stabil dimana waktu pemutusan gangguan melebihi batas bawah *CCT* yang telah didapatkan dari *numerical simulation method* seperti pada tabel 4.12. Kurva berwarna “biru” menunjukkan kurva kondisi stabil dimana pemutusan gangguan kurang atau lebih dari batas bawah *CCT* yang telah didapatkan dari *numerical simulation method* seperti pada tabel 4.12. Kurva berwarna “hijau” merupakan *trajectory* kritis hasil dari metode yang diusulkan sehingga didapatkan nilai *CCT*. Berikut adalah hasil simulasi dengan menggunakan *trajectory* kritis pada setiap titik gangguan dimulai dari gangguan di titik A hingga titik K pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung pada bus *infinite* tanpa damping.

a. Titik Gangguan A

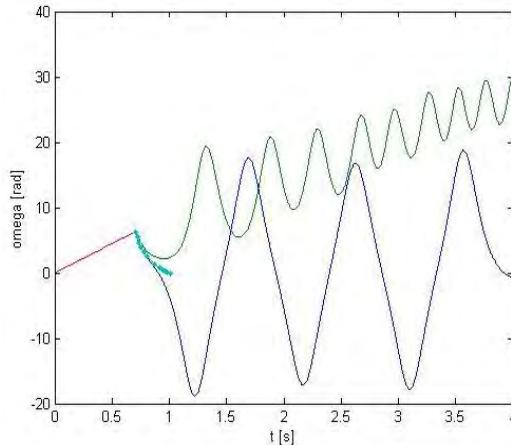
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,6912 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan pada saat 0,70 di antara 0,71 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.39. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

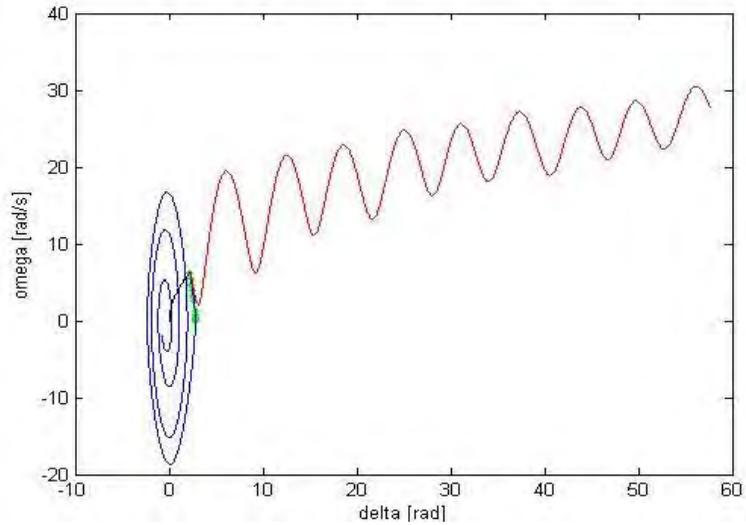


(b)

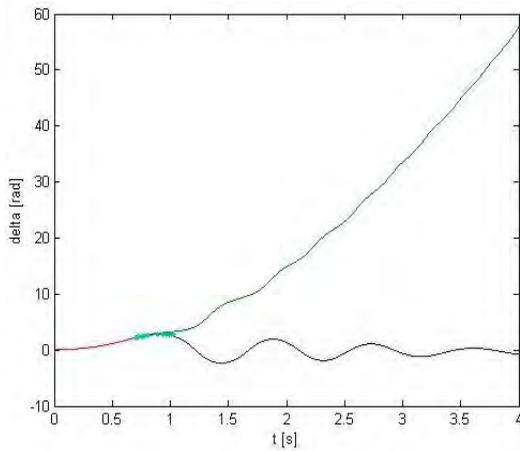
Gambar 4.40. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

b. Titik Gangguan B

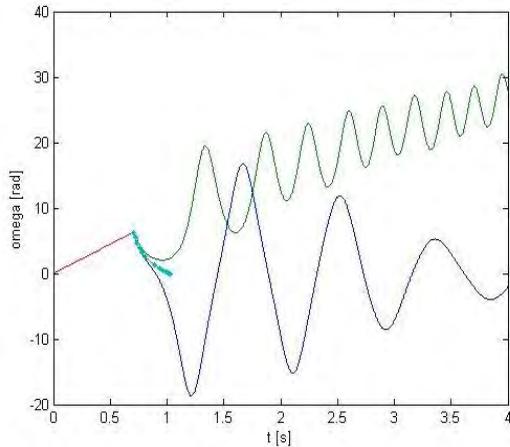
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,6958 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,70 dan 0,71 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.41. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan B pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

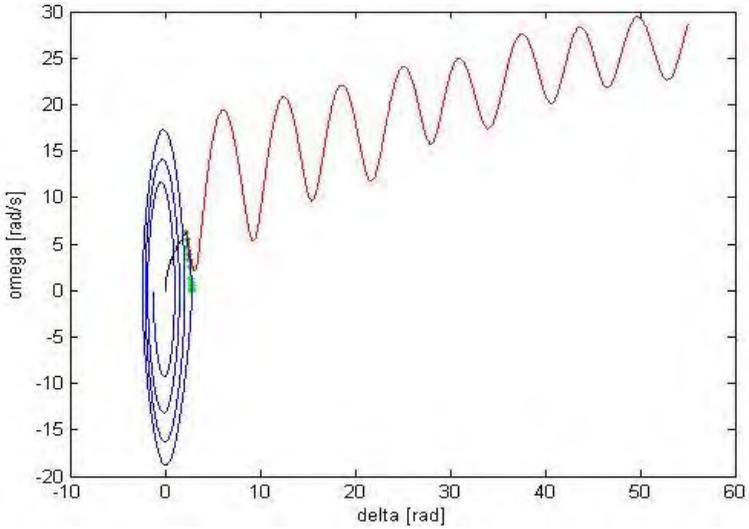


(b)

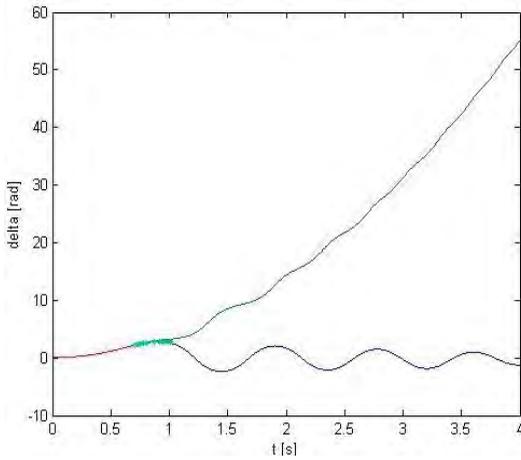
Gambar 4.42. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

c. Titik Gangguan C

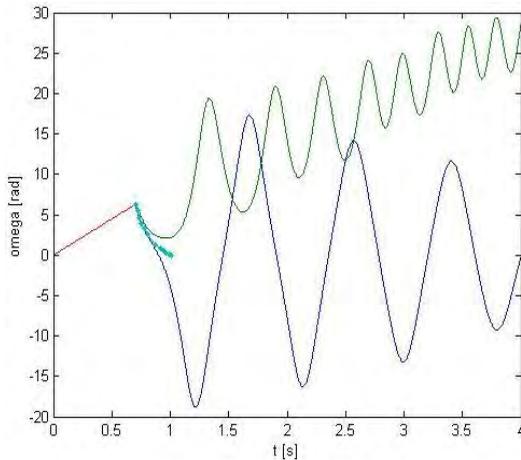
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,6918 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,70 dan 0,71 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.43. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



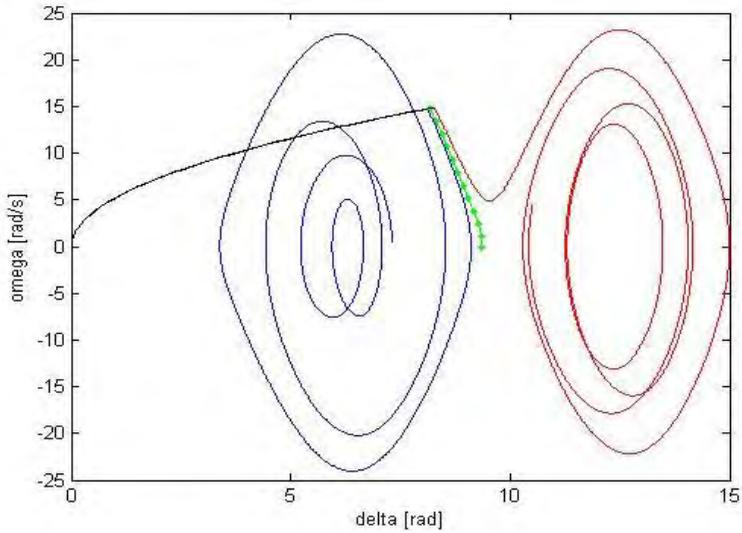
(a)



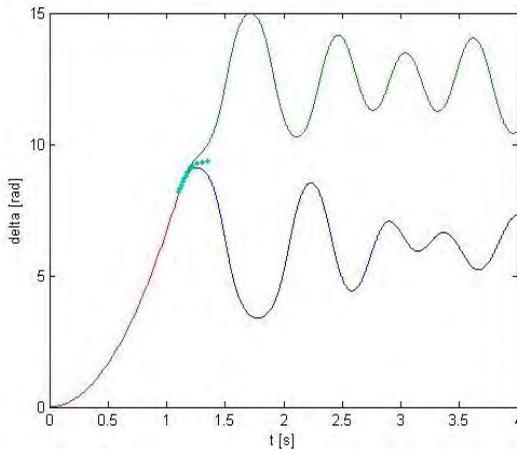
(b)
Gambar 4.44. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

d. Titik Gangguan D

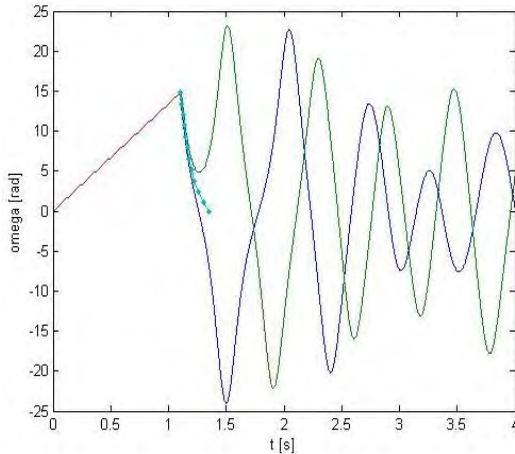
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1,1035 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 1,10 dan 1,11 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.45. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan D pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

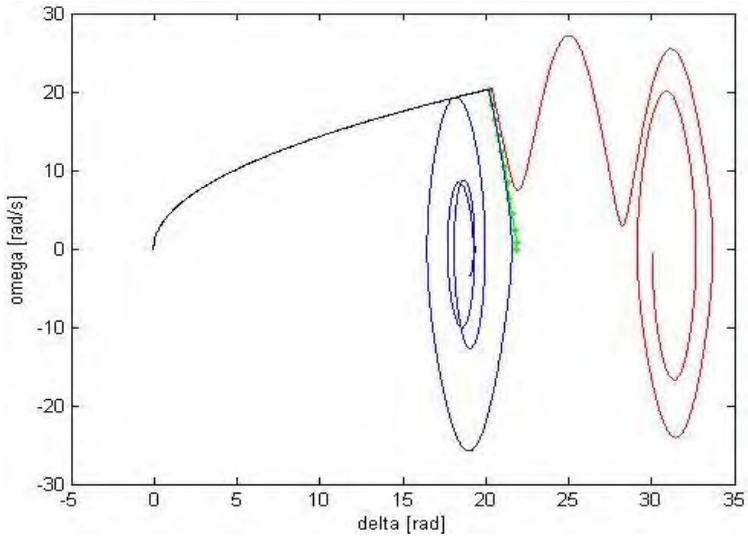


(b)

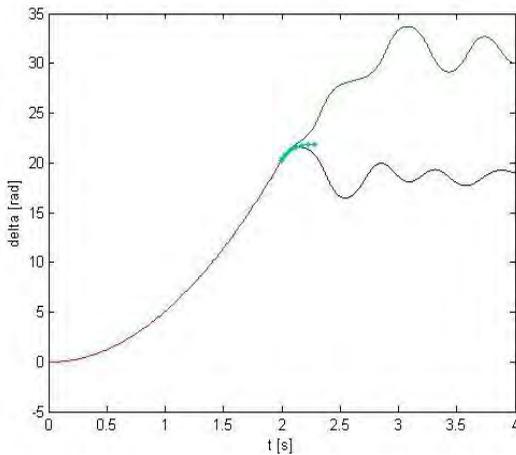
Gambar 4.46. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

e. Titik Gangguan E

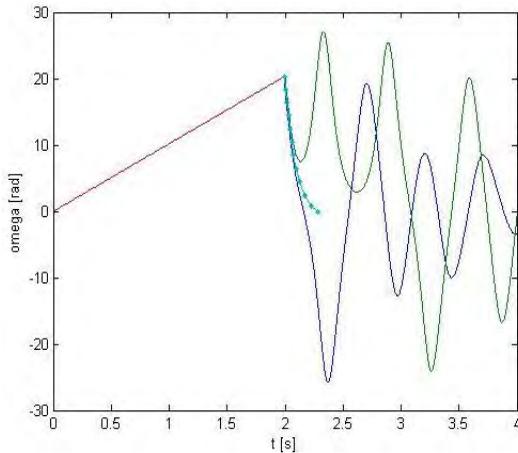
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1,9923 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 1,99 dan 2,00 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.47. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan E pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

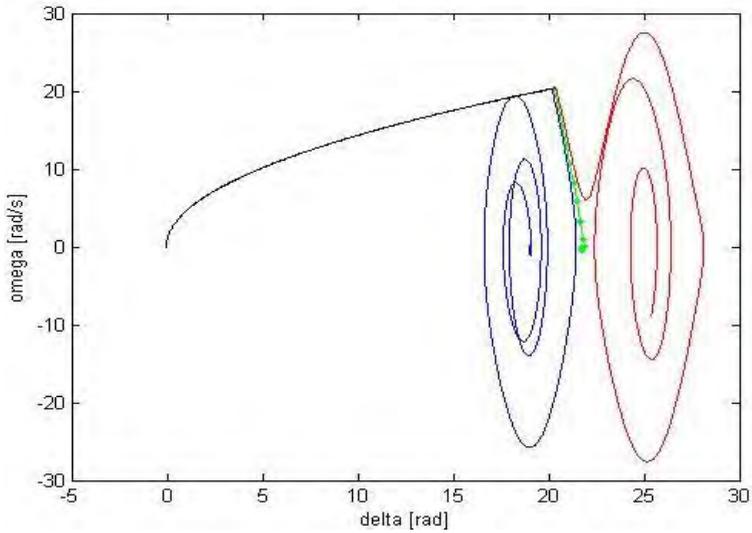


(b)

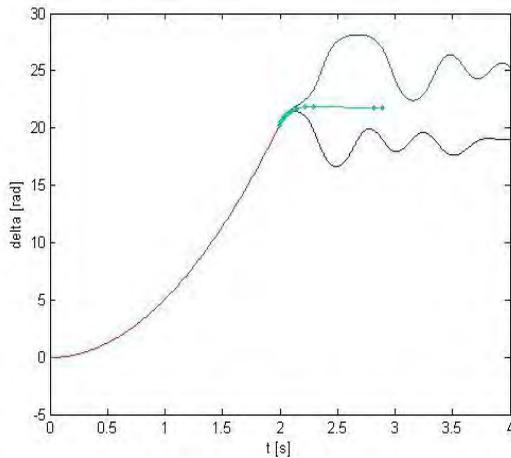
Gambar 4.48. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

f. Titik Gangguan F

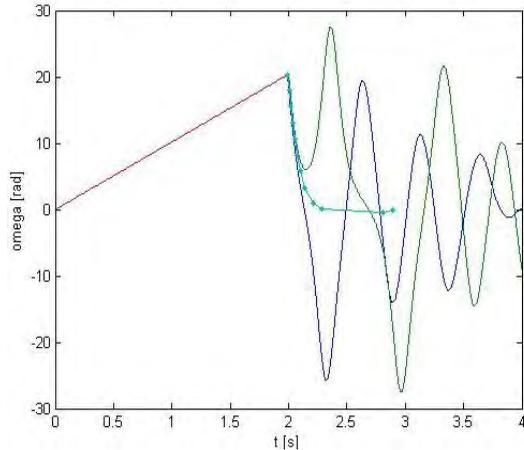
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1,9939 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 1,99 dan 2,00 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.49. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan F pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



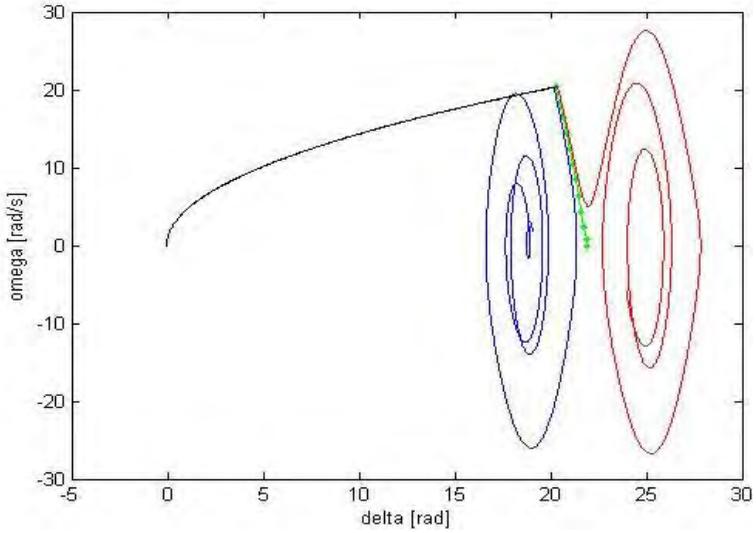
(a)



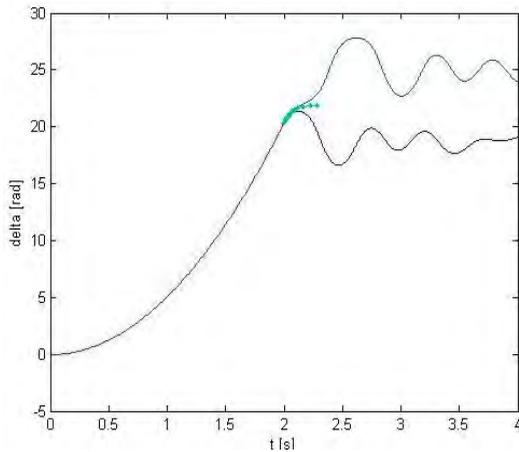
(b)
Gambar 4.50. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

g. Titik Gangguan G

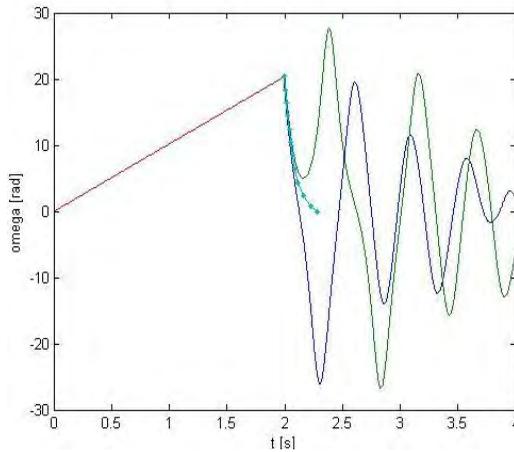
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1,9962 detik yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 1,99 dan 2,00 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.51. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan G pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

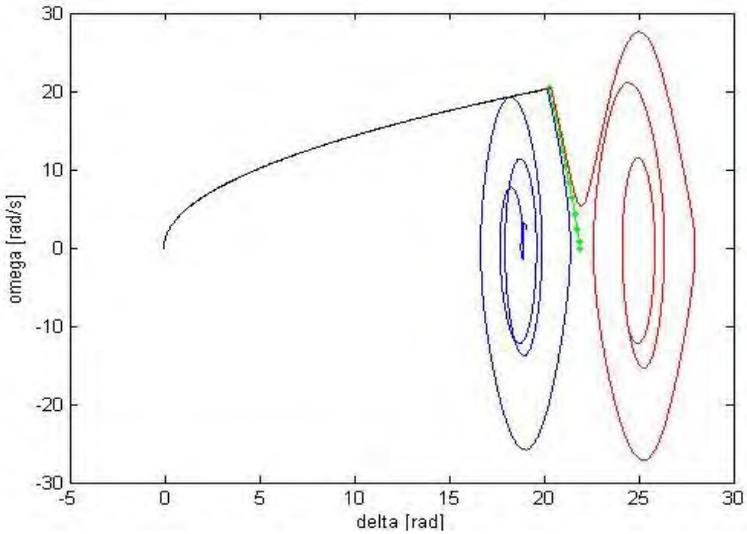


(b)

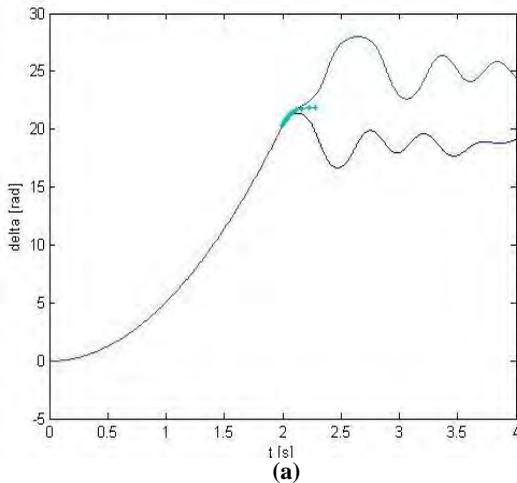
Gambar 4.52. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

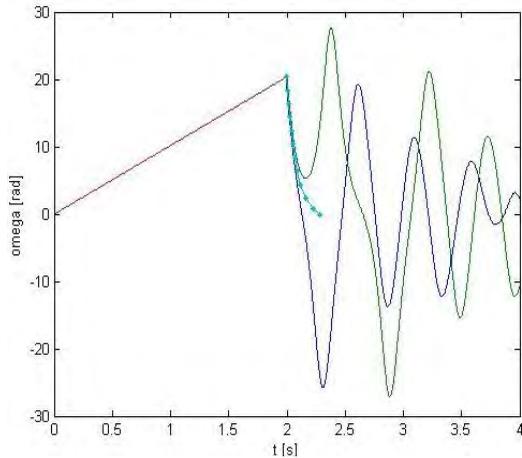
h. Titik Gangguan H

CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1,9958 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 1,99 dan 2,00 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.53. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



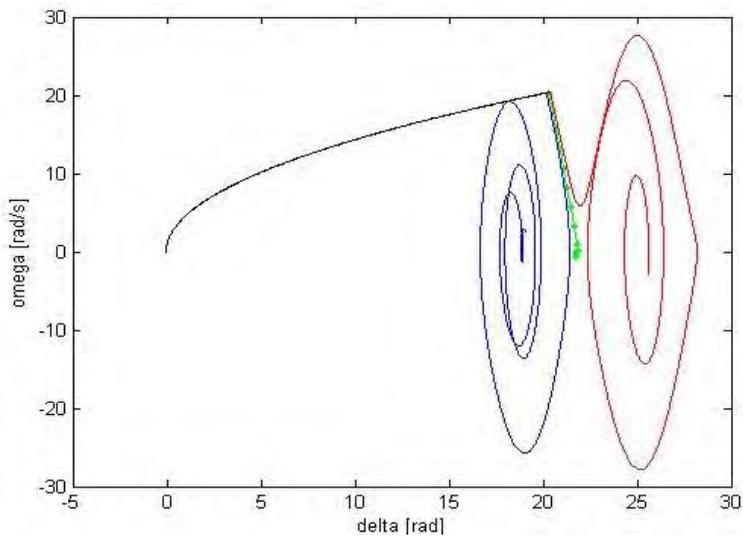


(b)

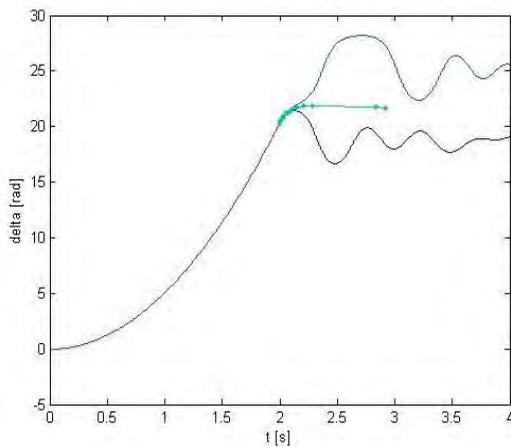
Gambar 4.54. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

i. Titik Gangguan I

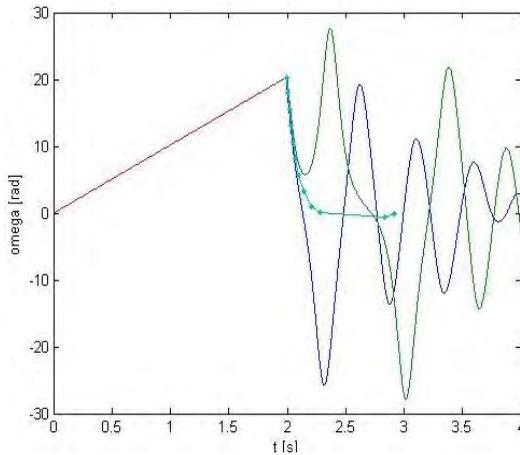
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1,9945 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 1,99 dan 2,00 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.55. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

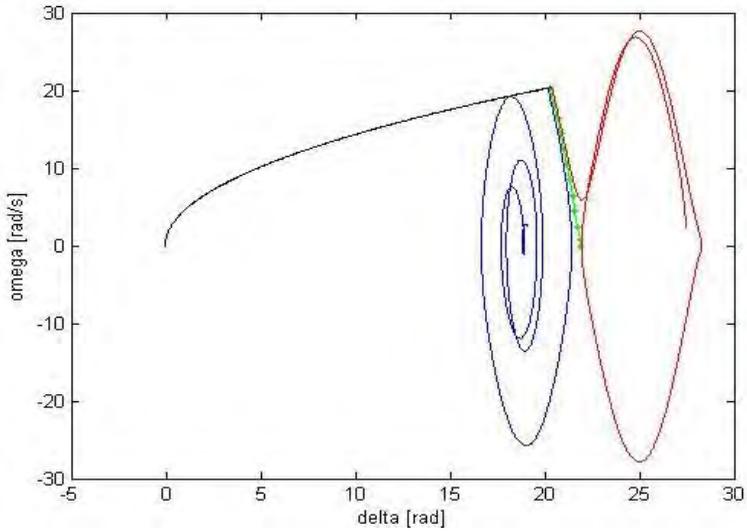


(b)

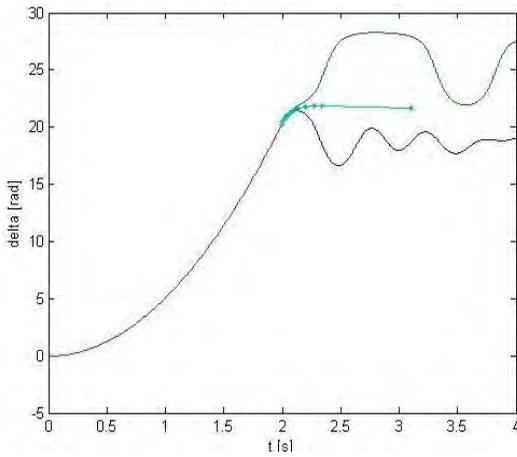
Gambar 4.56. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

j. Titik Gangguan J

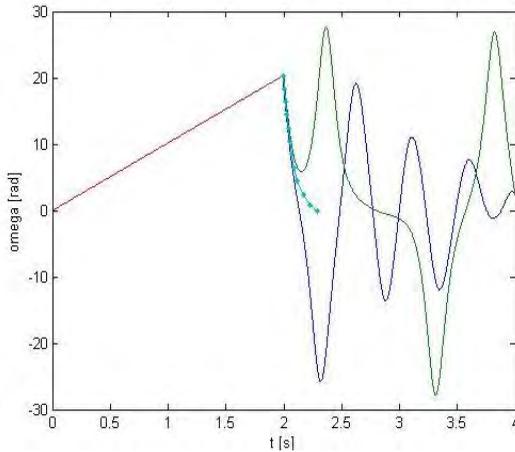
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1,9952 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 1,99 dan 2,00 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.57. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan J pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)

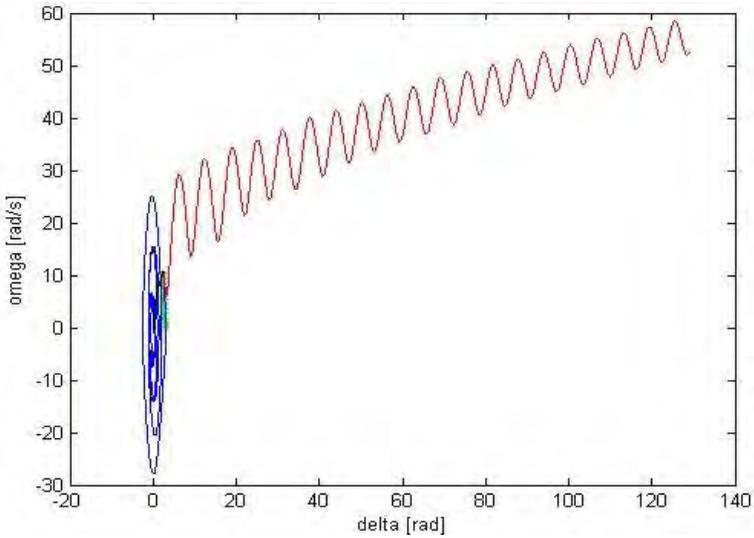


(b)

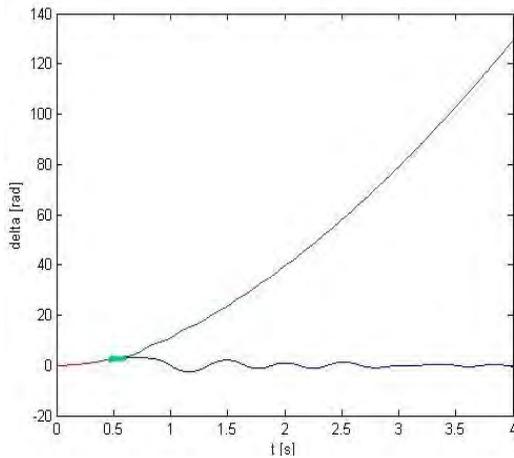
Gambar 4.58. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

k. Titik Gangguan K

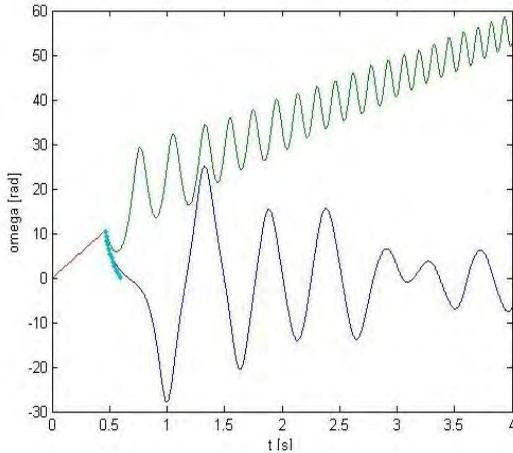
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,4632 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,46 dan 0,47 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.59. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*



(a)



(b)
Gambar 4.60. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* tanpa *damping*

Pada gambar 4.39 – 4.60 dapat terlihat perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil. Saat gangguan diputus kurang atau di antara waktu stabil dan tidak stabil maka sesuai *stable trajectory*, sudut rotor dan kecepatan sudut rotor akan kembali beresilasi menuju kestabilan. Sementara itu saat gangguan diputus lebih dari waktu tidak stabil maka sesuai *unstable trajectory*, sudut rotor dan kecepatan sudut rotor akan keluar dari batas kestabilan. Pada beberapa kasus, *stable trajectory* dan *unstable trajectory* akan membentuk kestabilan baru.

4.2.2. Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem IEEE 5 Generator-30 Bus yang Terhubung Bus Infinite dengan Damping

Simulasi pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite* dengan *damping*. Konstanta *damping* yang digunakan sebesar 5%. Seperti yang terlihat pada tabel 4.13, nilai *CCT* yang dihasilkan oleh metode yang diusulkan telah dibandingkan dengan nilai *CCT* yang dihasilkan dengan *numerical simulation method*. Terlihat bahwa nilai

hasil perhitungan *CCT* di setiap titik gangguan mendekati nilai *CCT* yang sebenarnya.

Tabel 4.14. Perbandingan nilai *CCT* hasil perhitungan metode yang diusulkan dengan nilai *CCT* hasil perhitungan *numerical simulation method* pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung bus *infinite* dengan *damping*

Fault Point	Open Line	Metode yang diusulkan		<i>numerical simulation method</i>		error
		CCT[s]	CPU[s]	CCT[s]	CPU[s]	
A	2-4	0,8327	2,9710	0,84-0,85	325,857	-0,869%
B	2-5	0,8358	2,7985	0,84-0,85	323,476	-0,5%
C	2-6	0,8322	2,8449	0,84-0,85	323,421	-0,929%
D	5-7	1,6223	3,0201	1,62-1,63	324,082	0
E	6-4	3,9094	4,5820	3,90-3,91	339,210	0
F	6-7	3,9138	4,2694	3,91-3,92	338,107	0
G	6-8	3,9110	4,4087	3,91-3,92	340,748	0
H	6-9	3,9122	4,2109	3,91-3,92	338,908	0
I	6-10	3,9119	4,0684	3,91-3,92	326,593	0
J	6-28	3,9117	4,2027	3,90-3,93	339,332	0
K	4-12	0,5506	3,0091	0,54-0,55	326,593	0,1091%
Rata-rata			3,6714		331,484	

Metode yang diusulkan termasuk metode langsung (*direct method*), karena nilai *CCT* yang dihasilkan dapat ditentukan secara langsung. Sedangkan *numerical simulation method* termasuk metode tidak langsung (*indirect method*), karena nilai *CCT* yang ditemukan berada dalam *range* waktu antara saat kondisi stabil dan kondisi tidak stabil setelah terjadi gangguan pada sistem. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik A diperoleh *CCT numerical simulation method* sebesar 0,84-0,85 detik. Hal ini berarti sistem masih berada dalam keadaan stabil saat waktu pemutusan gangguan di atas 0,84 detik, namun saat waktu pemutusan gangguan di atas 0,85 detik maka sistem berada dalam keadaan tidak stabil. Sehingga waktu antara 0,84-0,85 detik merupakan *critical clearing time (CCT)*.

Waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai *CCT* dari kedua metode berbeda. Untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil dari *numerical simulation method* adalah dengan *trial and error* untuk setiap titik gangguannya. Diasumsikan bahwa untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil dibutuhkan 10 kali percobaan dimana masing-masing percobaannya diasumsikan

butuh waktu 30 detik ditambah waktu proses *running* programnya. Sehingga dapat dirumuskan waktu (CPU) untuk mendapatkan nilai *range* waktu antara stabil dan tidak stabil adalah sebagai berikut:

$$CPU [s] = 10 \times (30 + \text{Waktu running program})$$

Sedangkan untuk menentukan waktu (CPU) dengan metode yang diusulkan didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

Nilai *error* adalah perbandingan antara nilai *CCT* dari metode yang diusulkan berada di antara batas nilai waktu keadaan stabil (*tcs*) dan nilai waktu keadaan tidak stabil (*tcu*) dari *numerical simulation method*. Dapat dirumuskan untuk mendapatkan nilai *error* adalah sebagai berikut:

$$error = \frac{\text{nilai } cct - tcu \text{ atau } tcs}{tcu \text{ atau } tcs}$$

Pada beberapa titik gangguan terdapat *error* antara nilai *CCT* dengan batas waktu stabil dan waktu tidak stabil. Nilai *error* yang didapatkan pada titik gangguan A sebesar -0,869%, titik gangguan B sebesar -0,5%, titik gangguan C sebesar -0,929%, dan titik K sebesar 0,1091%. Pada titik gangguan lain, nilai *CCT* berada dalam *range* batas waktu stabil dan waktu tidak stabil. Pada titik gangguan A, B, dan C nilai *CCT* berada di bawah batas waktu stabil, sementara itu pada titik gangguan K nilai *CCT* berada di atas batas waktu tidak stabil. Pada nilai *error* bernilai minus (-) berarti nilai *CCT* berada di bawah batas waktu stabil, sebagai contoh pada titik gangguan A nilai *CCT* adalah 0,8327 detik dengan batas waktu stabil dan tidak stabil saat gangguan di titik A adalah 0,84-0,85 detik. Sehingga nilai *CCT* pada titik gangguan A berada di bawah batas waktu stabil dan tidak stabil, dan sistem masih dalam keadaan stabil pada *CCT* tersebut. Pada nilai *error* bernilai positif (+) berarti nilai *CCT* berada di atas batas waktu tidak stabil, sebagai contoh pada titik gangguan K nilai *CCT* adalah 0,5506 detik dengan batas waktu stabil dan tidak stabil saat gangguan di titik K adalah 0,54-0,55 detik.

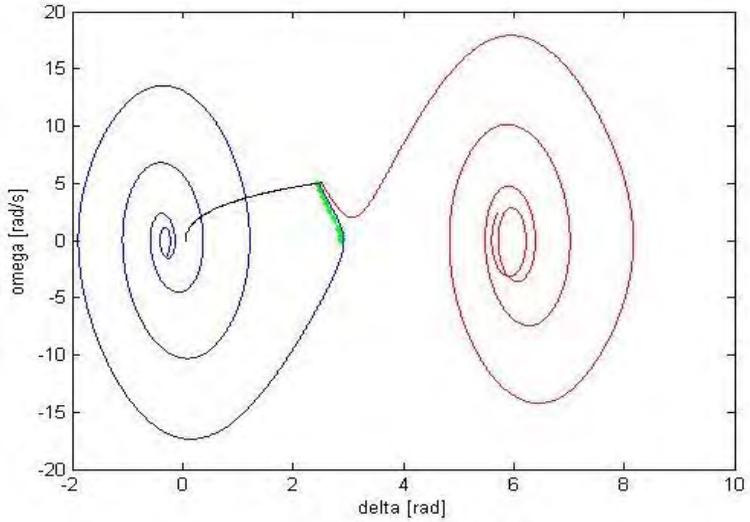
4.2.2.1. Analisis Grafik Karakteristik Sistem IEEE 5 generator-30 bus yang Terhubung ke Bus Infinite dengan Damping

Pada gambar grafik karakteristik 4.61 – 4.82 di bawah ini terlihat perbedaan antara kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem yang diwakili

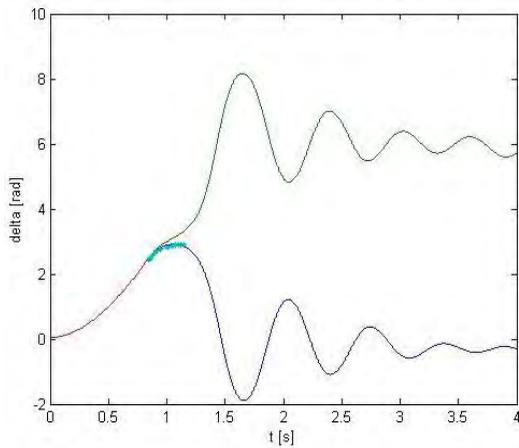
oleh generator kritis. Pada karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ), kurva berwarna “merah” menunjukkan kurva kondisi tidak stabil dimana waktu pemutusan gangguan melebihi batas bawah *CCT* yang telah didapatkan dari *numerical simulation method* seperti pada tabel 4.13. Kurva berwarna “biru” menunjukkan kurva kondisi stabil dimana pemutusan gangguan kurang atau lebih dari batas bawah *CCT* yang telah didapatkan dari *numerical simulation method* seperti pada tabel 4.13. Kurva berwarna “hijau” merupakan *trajectory* kritis hasil dari metode yang diusulkan sehingga didapatkan nilai *CCT*. Berikut adalah hasil simulasi dengan menggunakan *trajectory* kritis pada setiap titik gangguan dimulai dari gangguan di titik A hingga titik K pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung pada bus *infinite* tanpa damping.

a. Titik Gangguan A

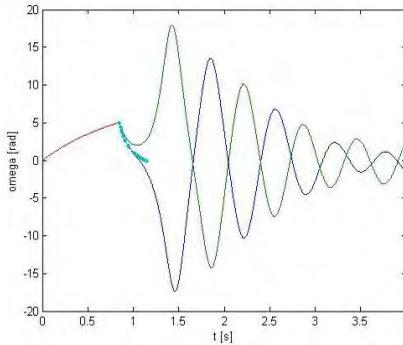
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,8327 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan pada saat 0,84 di antara 0,85 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.61. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan A pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

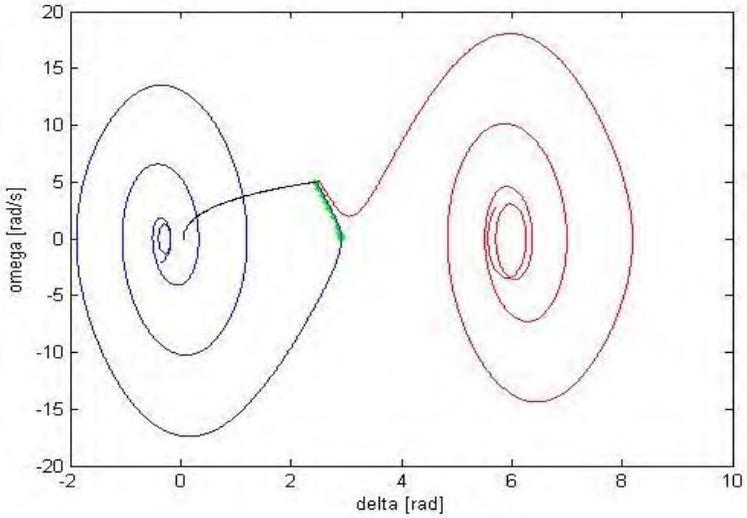


(b)

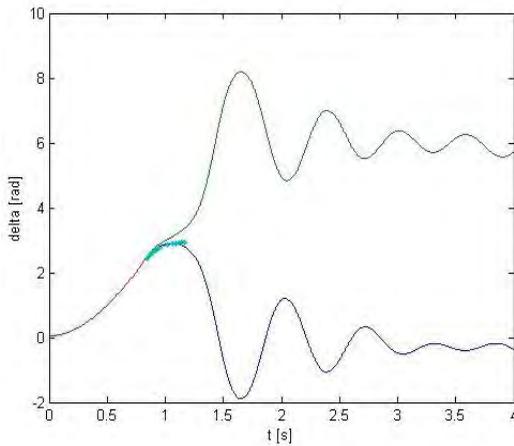
Gambar 4.62. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan A pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

b. Titik Gangguan B

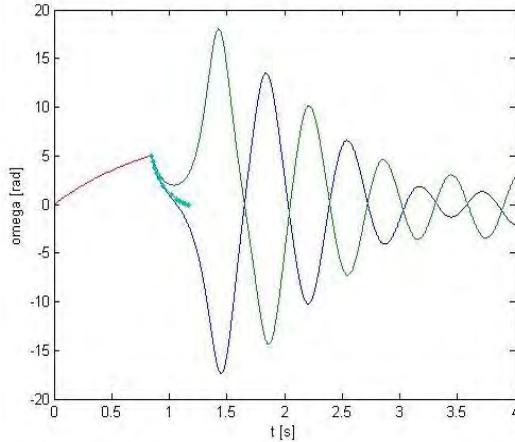
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,8358 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,84 dan 0,85 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.63. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan B pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

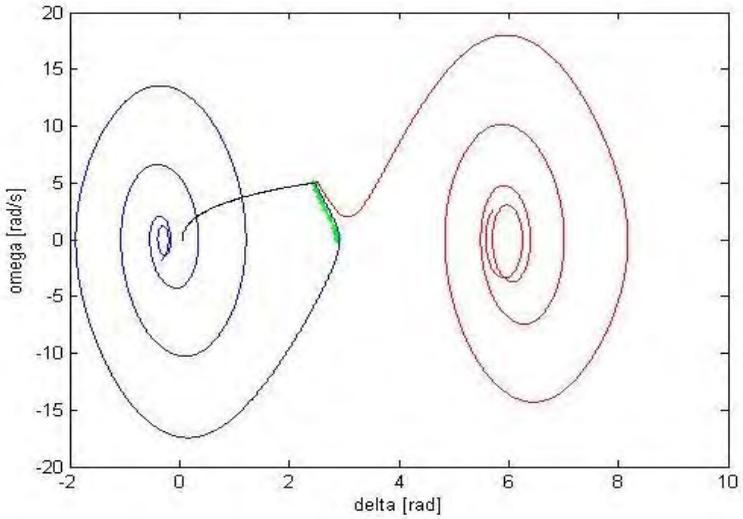


(b)

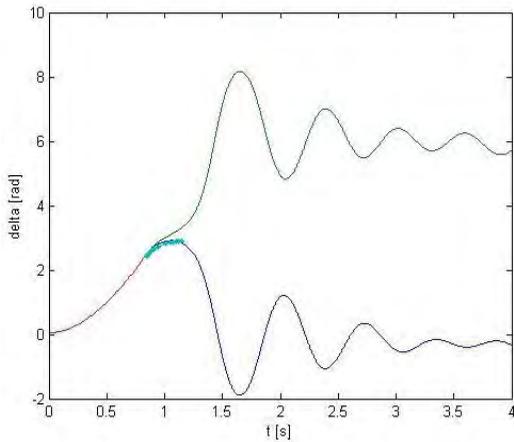
Gambar 4.64. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan B pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

c. Titik Gangguan C

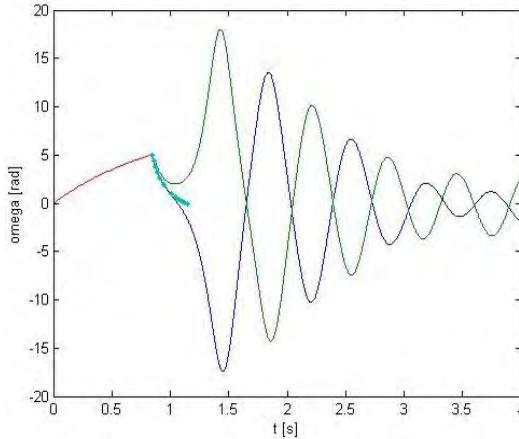
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,8322 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,84 dan 0,85 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.65. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan C pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

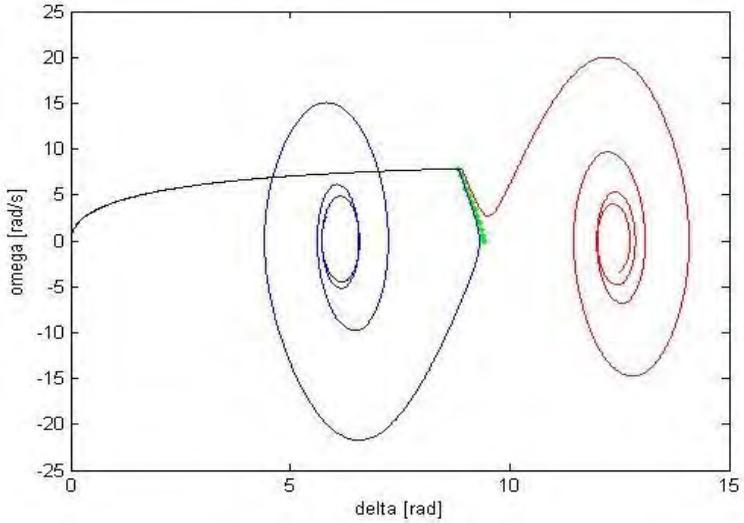


(b)

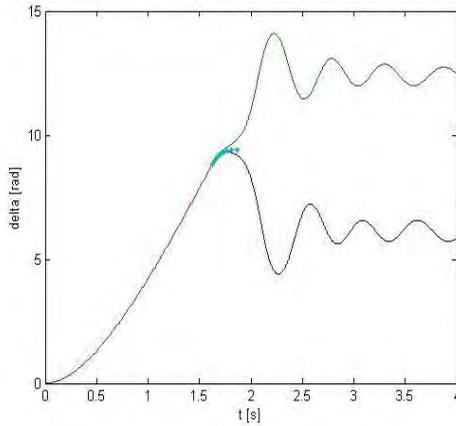
Gambar 4.66. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan C pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

d. Titik Gangguan D

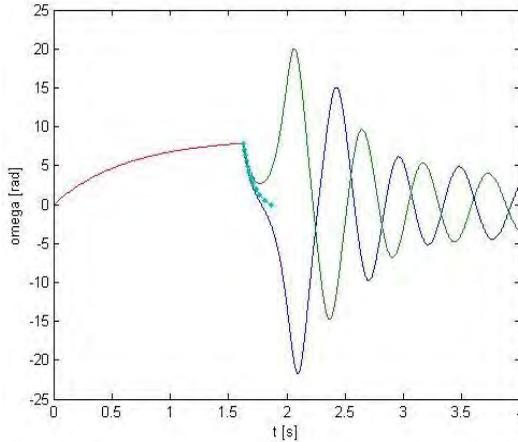
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 1,6223 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 1,62 dan 1,63 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.67. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan D pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

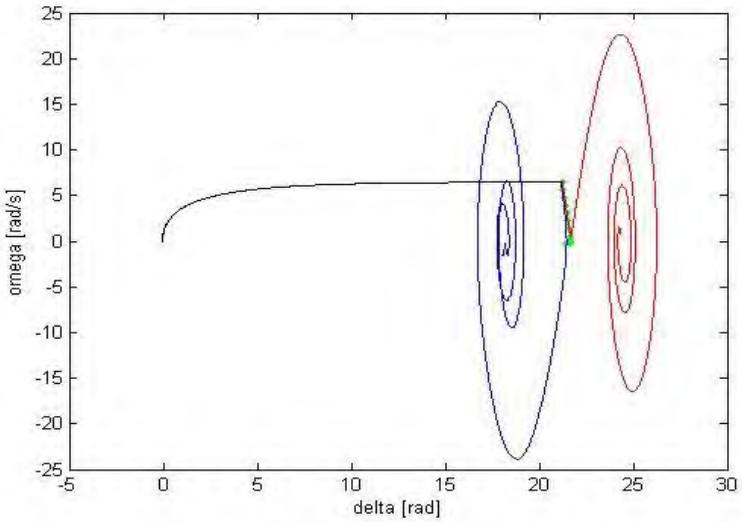


(b)

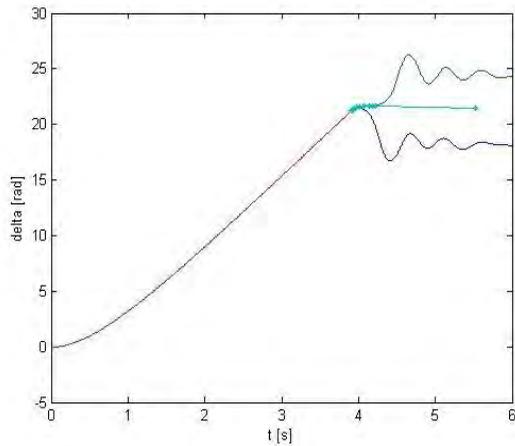
Gambar 4.68. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan D pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

e. Titik Gangguan E

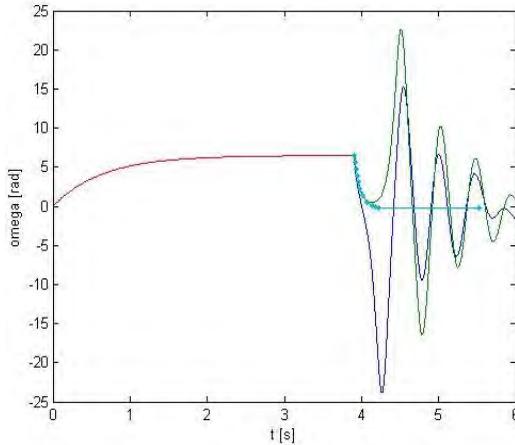
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 3,9094 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 3,90 dan 3,91 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 6 detik.



Gambar 4.69. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan E pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

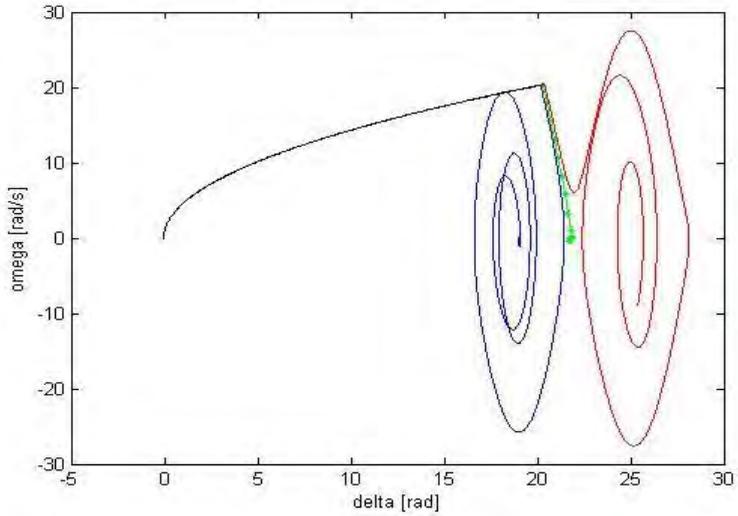


(b)

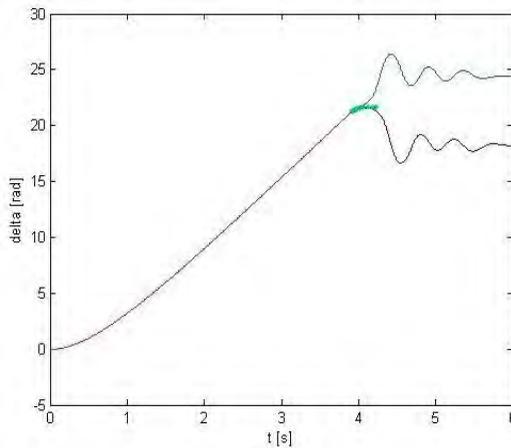
Gambar 4.70. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan E pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

f. Titik Gangguan F

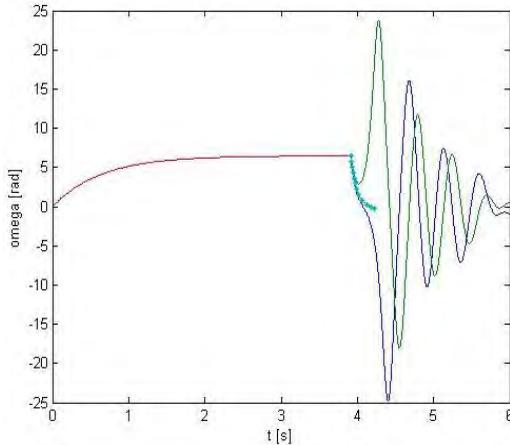
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 3,9138 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 3,92 dan 3,93 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 6 detik.



Gambar 4.71. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan F pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

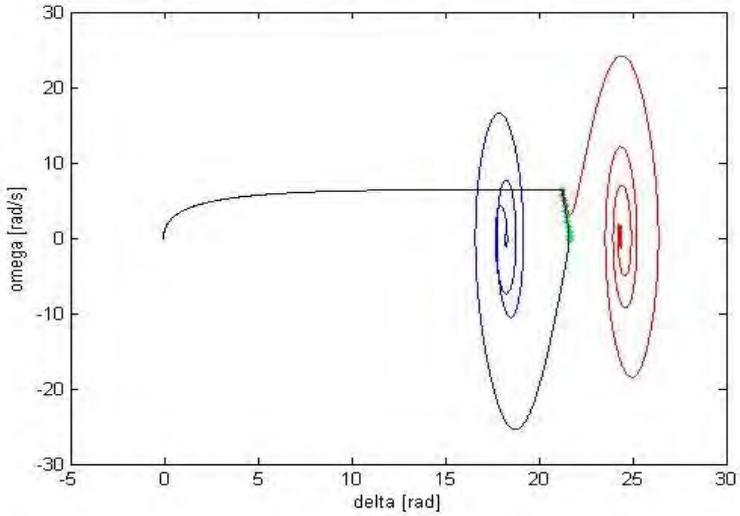


(b)

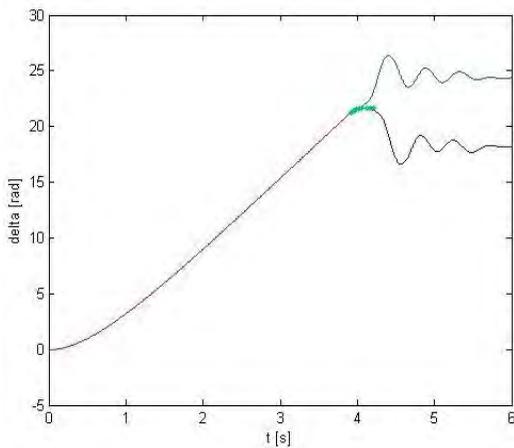
Gambar 4.72. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan F pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

g. Titik Gangguan G

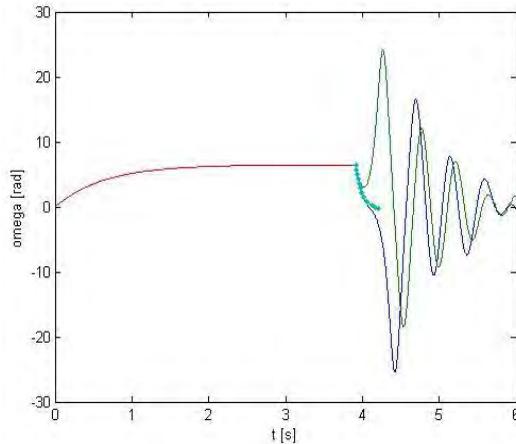
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 3,9110 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 3,91 dan 3,92 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 6 detik.



Gambar 4.73. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan G pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

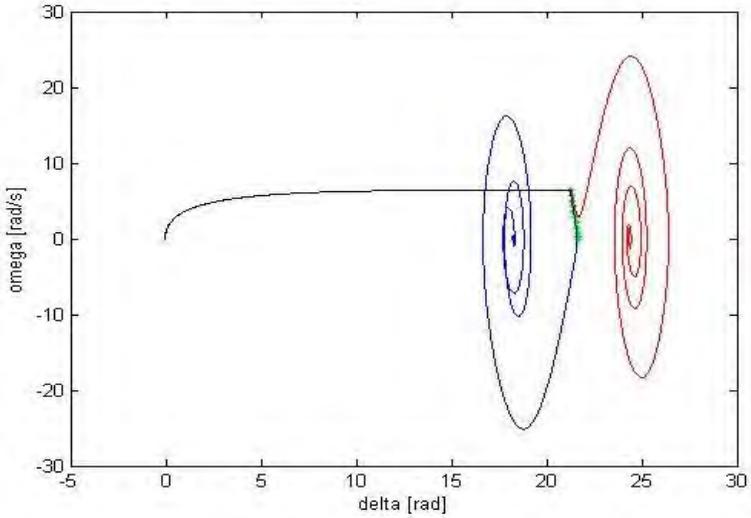


(b)

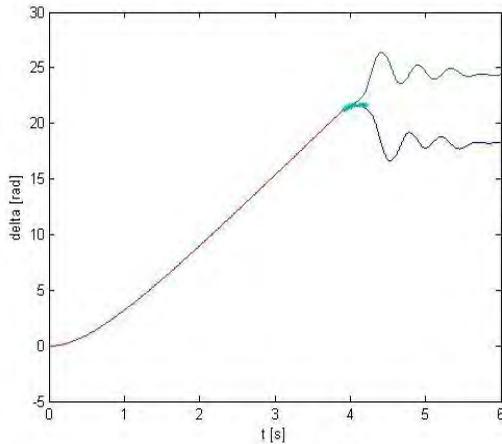
Gambar 4.74. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan G pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

h. Titik Gangguan H

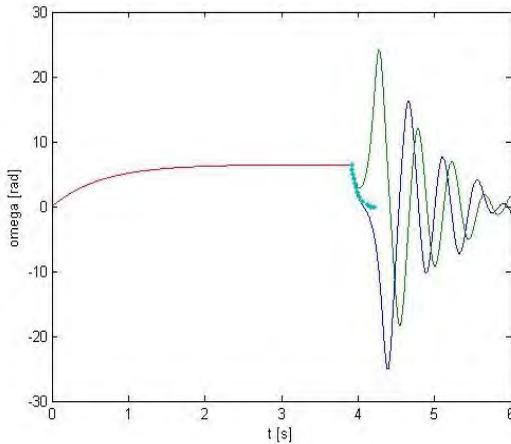
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 3,9122 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 3,91 dan 3,92 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 6 detik.



Gambar 4.75. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan H pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

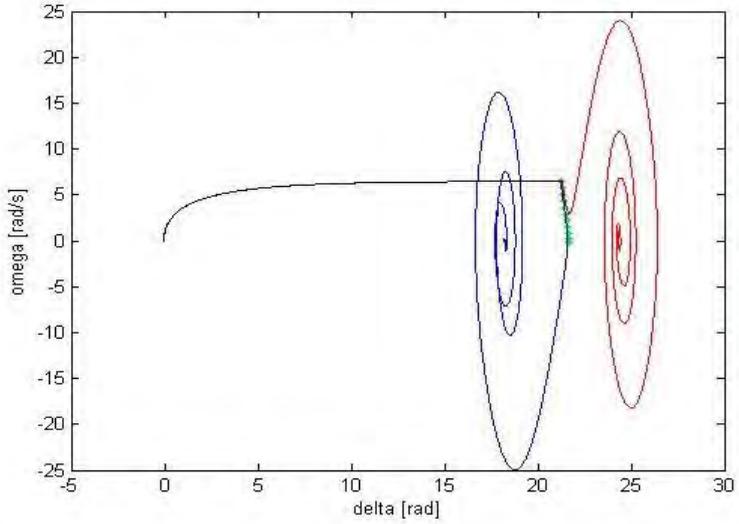


(b)

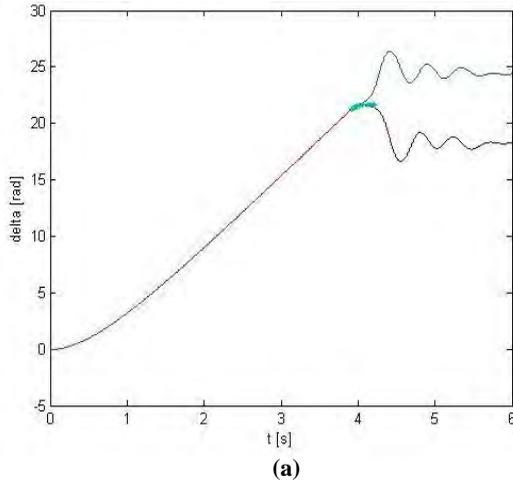
Gambar 4.76. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

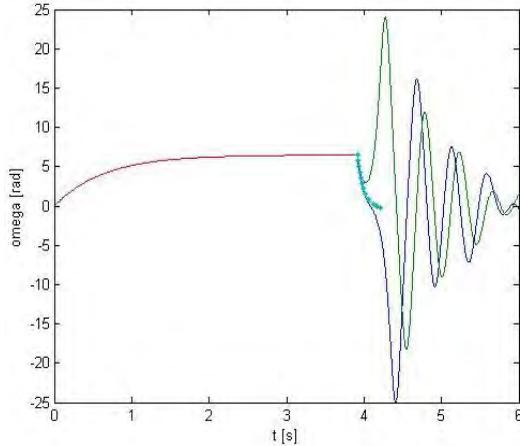
i. Titik Gangguan I

CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 3,9119 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau yang ditunjukkan pada kurva hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 3,91 dan 3,92 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 6 detik.



Gambar 4.77. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



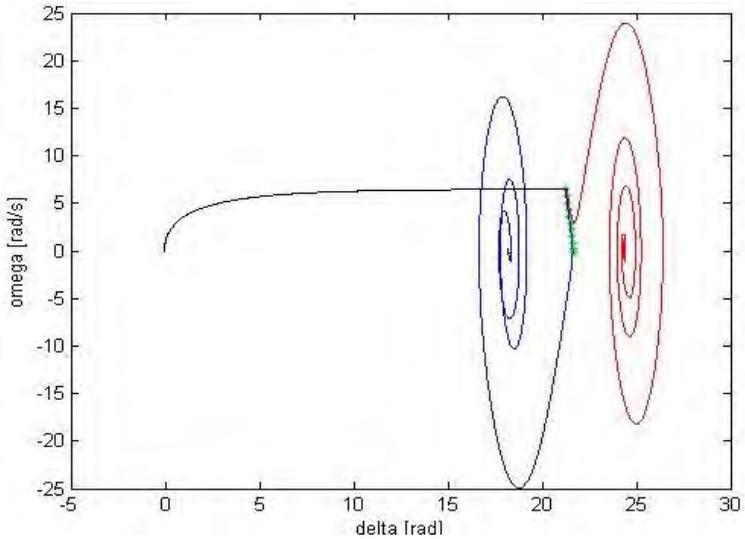


(b)

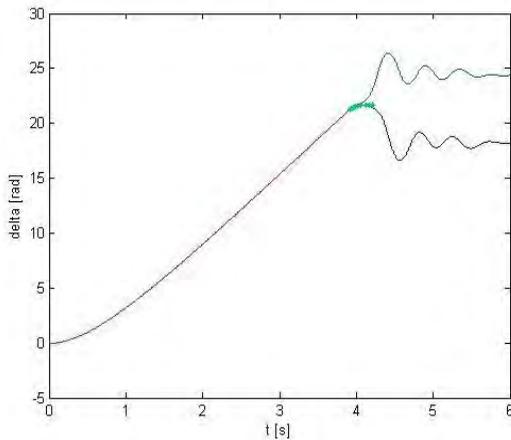
Gambar 4.78. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan I pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

j. Titik Gangguan J

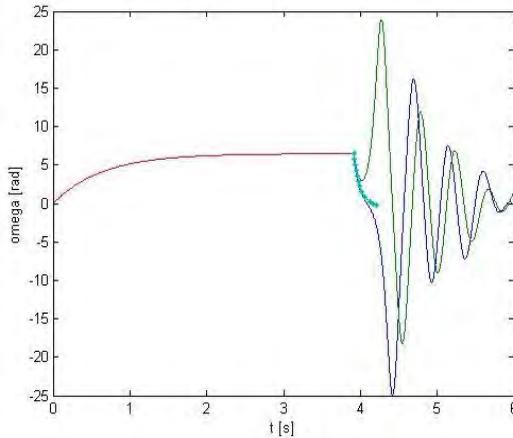
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 3,9117 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 3,91 dan 3,92 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 6 detik.



Gambar 4.79. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan J pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)

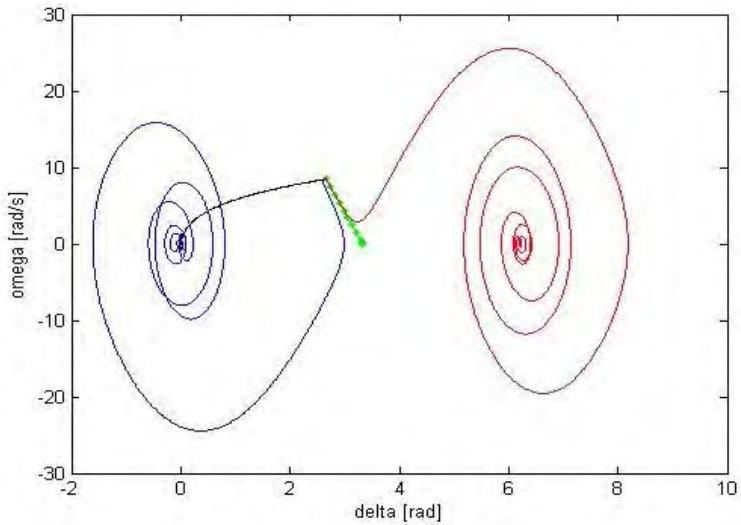


(b)

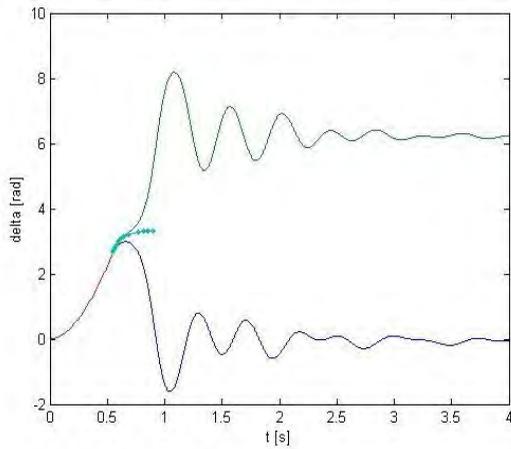
Gambar 4.80. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

k. Titik Gangguan K

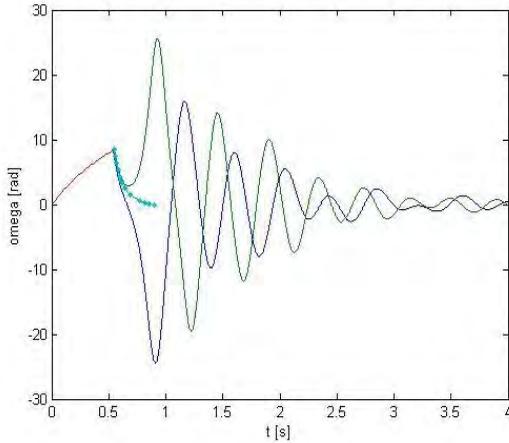
CCT yang diperoleh dari metode yang diusulkan adalah 0,5506 detik yang ditunjukkan pada kurva warna hijau pada grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) terhadap sudut rotor (δ). Waktu pemutusan gangguan di antara 0,54 dan 0,55 detik yang diperoleh dari *numerical simulation method*. Hasil simulasi ditampilkan dengan waktu simulasi (*tes*) 4 detik.



Gambar 4.81. Grafik karakteristik kecepatan sudut (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad di titik gangguan I pada sistem 5 generator-30 bus yang terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*



(a)



(b)

Gambar 4.82. (a) Grafik karakteristik sudut rotor atau δ (rad) terhadap waktu (s) dan (b) kecepatan sudut rotor atau ω (rad/s) terhadap waktu (s) di titik gangguan H pada sistem 5 generator-30 bus terhubung ke bus *infinite* dengan *damping*

Pada gambar 4.61 – 4.82 dapat terlihat perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil. Saat gangguan diputus kurang atau di antara waktu stabil dan tidak stabil maka sesuai *stable trajectory*, sudut rotor dan kecepatan sudut rotor akan kembali beresilasi menuju kestabilan. Sementara itu saat gangguan diputus lebih dari waktu tidak stabil maka sesuai *unstable trajectory*, sudut rotor dan kecepatan sudut rotor akan keluar dari batas kestabilan. Pada beberapa kasus, *stable trajectory* dan *unstable trajectory* akan membentuk kestabilan baru.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan dari hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada perhitungan *CCT* secara langsung dengan menggunakan modifikasi metode hilangnya sinkronisasi pada sistem yang terhubung ke bus *infinite* dapat disimpulkan bahwa :

1. Metode perhitungan *CCT* yang diusulkan pada sistem 2 generator 9 bus yang terhubung bus *infinite* dan 5 generator 30 bus yang terhubung bus *infinite* sudah mampu memberikan penilaian sebuah kestabilan transien dengan mempresentasikan hasil *CCT* pada sebuah sistem multi mesin, dimana dapat terlihat batas kestabilan dan ketidakstabilan waktu pemutusan gangguan dari sistem. Misal pada titik gangguan A sistem 2 generator 9 bus terhubung bus *infinite* dengan *damping* terlihat batas kestabilannya pada 0,22 detik dan batas ketidakstabilannya pada 0,23 detik.
2. Metode perhitungan *CCT* yang diusulkan dapat langsung menentukan nilai setiap titik gangguan. Hal ini tidak seperti pada *numerical simulation method* yang hanya menentukan batasan dari *CCT*.
3. Metode perhitungan *CCT* yang diusulkan tidak memerlukan waktu yang cukup lama seperti pada *numerical simulation method* ditunjukkan pada waktu rata-rata yang dibutuhkan menghitung *CCT* untuk kedua sistem lebih lama dibandingkan dengan menggunakan metode yang diusulkan. Misal pada sistem 2 generator 9 bus terhubung bus *infinite* dengan *damping* waktu yang dibutuhkan *numerical simulation method* adalah 311,98 detik dan metode yang diusulkan membutuhkan waktu 1,48257 detik. Sementara analisa *transient online assessment* mengambil data setiap 5 menit (300 detik)
4. Metode perhitungan *CCT* yang diusulkan pada sistem 2 generator 9 bus yang terhubung bus *infinite* dan 5 generator 30 bus yang terhubung bus *infinite* sudah terbukti tepat karena hasil yang didapatkan *critical clearing time* terletak diantara waktu kritis ketika keadaan sistem stabil dan tidak stabil meski pada beberapa kasus terdapat perbedaan dengan hasil tidak lebih dari 0.02 detik.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan dari hasil simulasi pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Metode perhitungan *CCT* yang diusulkan perlu diuji dengan berbagai macam sistem tenaga listrik di industri. Sehingga metode yang diusulkan dapat memecahkan masalah transien yang muncul di sistem tenaga listrik perindustrian.
2. Perlu dilakukan pengkajian mendalam mengenai penerapan metode perhitungan *CCT* yang diusulkan pada sistem multi mesin yang lebih kompleks dengan penambahan kontroler berupa AVR dan *governor* pada pemodelan generator. Sehingga mampu untuk membuktikan keakuratan metode dalam memberikan penilaian terhadap kestabilan sistem multimesin yang *universal*.
3. Dibutuhkan studi lanjut untuk membuat metode yang diusulkan ini menjadi metode yang dapat langsung menilai kestabilan transien dari suatu sistem tenaga listrik dalam waktu singkat dan dapat langsung melakukan tindakan untuk menjaga kestabilan transien pada sistem tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and Classification of Power System Stability," *IEEE Transaction on Power System*, Vol.19, No.2, May. 2004.
- [2] Grainger, Jhon. J dan William D. Stevenson, JR, *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, Inc,
- [3] Kundur, P, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [4] N. Yorino, A. Priyadi, Y. Zoka. "A Method for Transient Stability Assessment Based on Critical Trajectory". Proc. on The International Symposium on Sustainable Energy (ISSE), Tokyo, Japan. 2007.
- [5] Priyadi Ardyono, N. Yorino, dan Mauridhi H. P. "*Critical trajectory for Transient Stability Analysis*". Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. 2012
- [6] Yorino, Naoto, Ardyono Priyadi, Hironori Kakui, dan Mitsuhiro Takeshita. *A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability*. IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [7] Saadat, Hadi, *Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, Inc, 1999.
- [8] Yorino, Naoto, Ardyono Priyadi, Hironori Kakui, dan Mitsuhiro Takeshita. *A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability*. IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [9] Anderson, P. M. dan A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*. United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [10] A. Priyadi, N. Yorino, M. Tanaka, T. Fujiwara, Y. Zoka, H. Kakui, and M. Takeshita, "A Direct Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability Using Critical Generator Conditions," *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 22, no. 5, pp. 674-687, June 2012.
- [11] A. Priyadi, N. Yorino, Y. Sasaki, M. Tanaka, T. Fujiwara, Y. Zoka, H. Kakui, and M. Takeshita, "Comparison of Critical Trajectory Methods for Direct Method for Transient Stability," *IEEJ Transactions on Power and Energy*, vol. 130, no. 10, pp. 870-876, October 2010.

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Nama lengkap penulis adalah Aldhimas Satria Aditama. Penulis lahir di Surabaya pada tanggal 15 Agustus 1992. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Ir. Supriyadi dan Luthfi Noer Cholida, SE. Penulis memulai pendidikannya dari TK. Ksatria kemudian pindah ke TK Al Falah, Penulis melanjutkan pendidikan di SD Al Falah Taman Mayangkara Surabaya. Setelah lulus melanjutkan ke SMP Negeri 13 Surabaya. Setelah lulus diterima di SMA Negeri 10 Surabaya. Setelah lulus dari jenjang pendidikan SMA pada tahun 2020, penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun yang sama. Konsentrasi penulis adalah pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan selama masa perkuliahan, penulis aktif menjadi sebagai pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro ITS, sebagai OC di SITIA, Dasisten laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Di luar kampus, Penulis aktif di organisasi AIESEC Surabaya.

Halaman ini sengaja dikosongkan