TUGAS AKHIR - EE 184801

PERBAIKAN NILAI *CRITICAL CLEARING TIME* MENGGUNAKAN *SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE* BERDASARKAN *CRITICAL TRAJECTORY* DALAM SISTEM MULTIMESIN DENGAN PENAMBAHAN *DAMPING*

Risqiya Maulana
NRP 07 11 16 4000 0095

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

TUGAS AKHIR - EE 184801

PERBAIKAN NILAI *CRITICAL CLEARING TIME* MENGGUNAKAN *SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE* BERDASARKAN *CRITICAL TRAJECTORY* DALAM SISTEM MULTIMESIN DENGAN PENAMBAHAN *DAMPING*

Risqiya Maulana
NRP 07 11 16 4000 0095

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2020

FINAL PRPJECT - EE 184801

IMPROVEMENT OF CRITICAL CLEARING TIME USING SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE BASED ON CRITICAL TRAJECTORY ON MULTI-MACHINE SYSTEM WITH THE ADDITION OF DAMPING

Risqiya Maulana
NRP 07 11 16 4000 0095

Supervisors
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Inteligence Electrical and Informatics Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2020

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS ASKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **"PERBAIKAN NILAI CRITICAL CLEARING TIME MENGGUNAKAN SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE BERDASARKAN CRITICAL TRAJECTORY DALAM SISTEM MULTIMESIN DENGAN PENAMBAHAN DAMPING"** adalah benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan materi yang tidak diizinakan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2020

Risqiya Maulana
07111640000095

Halaman ini sengaja dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN
PERBAIKAN NILAI *CRITICAL CLEARING TIME* MENGGUNAKAN *SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE* BERDASARKAN *CRITICAL TRAJECTORY* DALAM SISTEM MULTIMESIN DENGAN PENAMBAHAN *DAMPING*

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperolah Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen teknik Elektro
FakultasTeknologi Elektro dan Informatika Cerdas
Institut Teknologi Sepeuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO DAN INFORMATIKA CERDAS
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

Dr. Eng. Ardyono P riyadi, S.T., M. Eng
NIP. 197309271998031004

SURABAYA
JULI, 2020

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERBAIKAN NILAI *CRITICAL CLEARING TIME* MENGGUNAKAN *SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE* BERDASARKAN *CRITICAL TRAJECTORY* DALAM SISTEM MULTIMESIN DENGAN PENAMBAHAN *DAMPING*

Nama Mahasiswa : Risqiya Maulana
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M. Eng.
Dosen Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

Abstrak:

Kestabilan merupakan aspek yang sangat penting pada sistem kelistrikan. Saat terjadi gangguan, sistem kelistrikan pasti akan diamankan oleh pengaman sistem, sehingga mengamankan seluruh sistem. Namun ketika gangguan sudah hilang dan sistem berjalan seperti semula, belum tentu sistem kembali stabil pada kondisi semula. Menjaga kestabilan bisa dilakukan dengan memperpanjang waktu operasi sistem pengaman. Salah satu cara untuk memperpanjang waktu operasi sistem pengaman sistem yaitu dengan memperbesar nilai *Critical Clearing Time*. *Critical Clearing Time* merupakan waktu maksimal pemutusan gangguan yang diperbolehkan untuk mengisolasi gangguan. *Damper winding* atau *damping* merupakan belitan peredam pada generator yang digunakan untuk meredam osilasi akibat terjadi gangguan pada sistem. Dengan teredamnya osilasi, nilai *Critical Clearing Time* juga akan naik. *Supercapacitor Energy Storage* merupakan alat yang mampu menyimpan energi dan mengeluarkannya dalam jumlah besar dengan waktu yang singkat. Pemasangannya pada sistem dapat meningkatkan nilai *Critical Clearing Time* sehingga sistem mampu mengisolasi gangguan. Perhitungan nilai *Critical Clearing Time* pada penelitian ini menggunakan metode *Critical Trajectory* berbasis *Losing Synchronism*.

Kata kunci: *Kestabilan, Critical Clearing Time, Damper Winding, Supercapacitor Energy Storage, Critical Trajectory, Losing Synchronism*

Halaman ini sengaja dikosongkan

IMPROVEMENT OF CRITICAL CLEARING TIME USING SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE BASED ON CRITICAL TRAJECTORY ON MULTI-MACHINE SYSTEM WITH THE ADDITION OF DAMPING

Student Name : Risqiya Maulana
Supervisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M. Eng.
Supervisor II : Ir. Sjamsjul Anam, M.T.

Abstract:

Stability is a very important aspect of the electrical system. When a failure occurs, the electrical system will be secured by the security system, thus securing the entire system. But when the failure is gone and the system is running as before, it is not certain that the system will return to its original condition. Maintaining stability can be done by extending the safety system operating time. One way to extend the operating time for a security system is to increase the value of Critical Clearing Time. Critical Clearing Time is the maximum time the interruption is allowed to isolate the failure. Damper winding or damping, is a winding damper on the generator that is used to reduce oscillation due to failure of the system. By reducing the oscillation, the value of Critical Clearing Time will also increase. Supercapacitor are devices that are able to store energy and release it in large quantities in a short time. Installation on the system can increase the value of Critical Clearing Time so that the system is able to isolate interference. Calculation of Critical Clearing Time values in this study uses the Critical Trajectory method based on Losing Synchronism.

Keywords: *Stability, Critical Clearing Time, Damper Winding, super kapasitor, Critical Trajectory, Losing Synchronism*

:

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Bismillahhirahmannirrahim dengan ini penulis mengucapkan *Alhamdulillahhirabbilalamin*, segala puji kehadirat Allah SWT telah melimpahkan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis mendapat nikmat sehat dan nikmat ilmu untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul : **"Perbaikan Nilai *Critical Clearing Time* Menggunakan *Supercapacitor Energy Storage* Berdasarkan *Critical Trajectory* Dalam Sistem Multimesin Dengan Penambahan *Damping*"**

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah berjasa dalam penyusunan Tugas Akhir ini, yaitu;

1. Segenap keluarga penulis, terutama kedua orang tua penulis. Bapak Untung Djoko Susilo dan Ibu Hermina Setyowaty, serta adik penulis, Diya Kasih Puspitasari yang telah memberikan seluruh hatinya dalam mendukung penulis dalam doa dan semangatnya.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M. Eng., selaku dosen pembimbing I dan Bapak Ir. Sjamsjul Anam, M.T., selaku dosen pembimbing II yang mengajarkan banyak ilmu dan memberi arahan
3. Talitha Puspita Sari selaku senior, serta Nazilla Iyyaya Fariha dan Rafin Aqsa Izza Mahendra selaku rekan topik transien yang menjadi tempat berbagi ilmu.
4. Teman-teman asisten LIPIST yang menjadi pengingat dan penyemangat
5. Erlanda, Aldo, Pristi, Vando, Yogi, Fachry, Veryl, Hilman, Finola, Irfan, Syarif, Rafin, Dicky, Adib dan Reza selaku teman nongkrong yang selalu membakar semangat penulis dan menghibur di kala suntuk
6. Rekan-rekan e56 selaku teman seangkatan sejak mahasiswa baru
7. Titis Nadya Basuki, yang selalu percaya pada kemampuan penulis dan tidak pernah menyerah.

Besar harapan penulis agar penelitian ini mampu memberikan manfaat. Jika terjadi kesalahan atau kekurangan, penulis berharap adanya kritik dan saran sebagai evaluasi di masa mendatang.

Surabaya, Juni 2020

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS ASKHIR ..... **i**
LEMBAR PENGESAHAN ..... **iii**
ABSTRAK **5**
ABSTRACT **7**
KATA PENGANTAR **9**
DAFTAR ISI **11**
DAFTAR GAMBAR ..... **xv**
DAFTAR TABEL ..... **xvii**
BAB 1 PENDAHULUAN **1**
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Perumusan Masalah 1
1.3. Tujuan 2
1.4. Batasan Masalah 2
1.5. Metodologi 2
1.5.1. Studi Literatur 3
1.5.2. Pengumpulan Data dan Parameter 3
1.5.3. Pemodelan Sistem dan Algoritma Program 3
1.5.4. Simulasi 3
1.5.5. Analisa Hasil 3
1.5.6. Penulisan Buku 4
1.6. Sistematika Penulisan 4
1.6.1. Bab I 4
1.6.2. Bab II 4
1.6.3. Bab III 4
1.6.4. Bab IV 4
1.6.5. Bab V 4
1.7. Relevansi 5
BAB 2 DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA **7**
2.1. Stabilitas pada Sistem Tenaga 7
2.1.1. Kestabilan Tegangan 7
2.1.2. Kestabilan Frekuensi 7
2.1.3. Kestabilan Sudut Rotor 7
2.2. Kestabilan Transien 8
2.3. Persamaan Ayunan 9
2.4. *Critical Clearing Time* 10
2.5. *Critical Trajectory* 11
2.6. *Supercapacitor Energy Storage* 12
2.7. *Damper Winding* 13

BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN METODOLOGI PENELITIAN 15
3.1. Metodologi Penelitian 15
3.2. Data Sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus..... 17
3.3. Aliran Daya 19
3.4. Reduksi Matriks 22
3.5. Pemodelan 23
3.6. Metode Runge-Kutta 24
3.7. Perumusan Masalah 24
3.7.1. Definisi Awal 24
3.7.2. Metode Modifikasi Persamaan Trapezoidal [1]..... 25
3.7.3. *Critical Trajectory* dengan Metode *Losing Synchronism* 27
3.8. Menentukan Nilai *Critical Clearing Time* 27
3.9. Modifikasi Sistem dengan Penambahan *Supercapacitor Energy Storage* 28
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS 31
4.1. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* Sebelum Penambahan SCES 31
4.1.1. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 0% Sebelum Penambahan SCES 32
4.1.2. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 1% Sebelum Penambahan SCES 37
4.1.3. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 5% Sebelum Penambahan SCES 42
4.2. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* Setelah Penambahan SCES 47
4.2.1. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 0% Setelah Penambahan SCES 48
4.2.2 Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 1% Setelah Penambahan SCES 55
4.2.3 Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 5% Setelah Penambahan SCES 63
4.3 Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan Perubahan Nilai *Damping* 71
4.3.1 Titik gangguan A..... 72
4.3.2 Titik gangguan B..... 72
4.3.3 Titik gangguan C..... 73
4.3.4 Titik gangguan D..... 74
4.3.5 Titik gangguan E 74

4.3.6 Titik gangguan F 75
4.3.7 Titik gangguan G 76
4.3.8 Titik gangguan H 76
4.3.9 Titik gangguan I 77
BAB 5 PENUTUP 79
5.1. Kesimpulan 79
5.2. Saran 79
DAFTAR PUSTAKA 81
LAMPIRAN 83
BIODATA PENULIS 169

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Respon sudut rotor terhadap gangguan 9
Gambar 2.2 Bentuk lintasan kritis 12
Gambar 2.3 Fluks pada stator generator tanpa Damper Winding 13
Gambar 2.4 Fluks pada stator generator dengan Damper Winding 14
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian 16
Gambar 3.2 Sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus 17
Gambar 3.3 Konsep Persamaan Trapezoidal 26
Gambar 3.4 Konsep CCT 28
Gambar 4.1 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 34
Gambar 4.2 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 34
Gambar 4.3 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 3 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 35
Gambar 4.4 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B 36
Gambar 4.5 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B 36
Gambar 4.6 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 3 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B 37
Gambar 4.7 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 39
Gambar 4.8 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 39
Gambar 4.9 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 3 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 40
Gambar 4.10 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B 41
Gambar 4.11 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B 41
Gambar 4.12 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B 42
Gambar 4.13 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 44
Gambar 4.14 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 44

Gambar 4.15 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A 45
Gambar 4.16 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B.....46
Gambar 4.17 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B.....46
Gambar 4.18 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 3 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B.....47

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Waktu Pemutusan Rele 11
Tabel 3.1 Data Transmisi Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus 18
Tabel 3.2 Data Bus Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus 19
Tabel 3.3 Hasil iterasi aliran daya pada generator..... 22
Tabel 4.1 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan Damping 0% Sebelum Penambahan SCES..... 32
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan Damping 1% Sebelum Penambahan SCES..... 38
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan Damping 5% Sebelum Penambahan SCES..... 43
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan A 48
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan B 49
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan C 50
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan D 51
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan E..... 52
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan F..... 52
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan G 53
Tabel 4.11 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan H 54
Tabel 4.12 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan I..... 55
Tabel 4.13 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan A 56
Tabel 4.14 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan B 57
Tabel 4.15 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan C 58
Tabel 4.16 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan D 59
Tabel 4.17 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan E..... 59
Tabel 4.18 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan F..... 60
Tabel 4.19 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan G 61
Tabel 4.20 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan H 62
Tabel 4.21 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan I..... 63
Tabel 4.22 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan A 64
Tabel 4.23 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan B 65
Tabel 4.24 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan C 66
Tabel 4.25 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan D 67
Tabel 4.26 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan E..... 67
Tabel 4.27 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan F..... 68
Tabel 4.28 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan G 69
Tabel 4.29 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan H 70

Tabel 4.30 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan I 71
Tabel 4.31 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan A.....72
Tabel 4.32 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan B.....73
Tabel 4.33 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan C.....73
Tabel 4.34 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan D.....74
Tabel 4.35 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan E 75
Tabel 4.36 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan F 75
Tabel 4.37 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan G.....76
Tabel 4.38 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan H.....77
Tabel 4.39 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan I 78

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dalam sistem tenaga listrik, kestabilan merupakan hal yang sangat penting dan harus sangat diperhatikan karena sangat berguna dalam menjaga kontinuitas dan keandalan sistem. Ketika sistem mengalami gangguan, perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk memastikan bahwa sistem bisa mempertahankan keadaan sinkronnya setelah terjadi gangguan. Misalnya, hubung singkat tiga fasa merupakan salah satu gangguan transien yang harus segera diatasi untuk mengatasi kehilangan sinkronisasi pada sistem agar tetap stabil. Untuk menjaga sistem tetap stabil, gangguan harus segera dihilangkan dengan mempertimbangkan *Critical Clearing Time* (CCT). CCT merupakan waktu maksimal pemutusan yang diperbolehkan untuk menghilangkan gangguan agar sistem kembali stabil setelah terjadi gangguan. Jika waktu pemutusan gangguan melebihi nilai CCT, sistem tadi menjadi tidak stabil.

Penentuan nilai CCT yang baik bisa menggunakan beberapa metode sepeti; *Energy Function*, *Time Domain Simulation*, dan *Critical Trajectory*. Namun metode *Critical Trajectory* adalah metode yang cocok karena hasil nilai yang didapat sangat akurat, karena ditentukan dengan menghitung perbedaan waktu antara SEP dan *exit point*. *Critical Trajectory* didefinisikan sebagai suatu lintasan yang dimulai dari titik saat gangguan terjadi hingga mencapai suatu titik kritis di mana sistem kehilangan sinkron [1].

Super Kapasitor adalah teknologi penyimpanan energi khususnya energi listrik yang berkapasitas sangat besar. Super Kapasitor sendiri mempunyai kerapatan daya yang lebih tinggi daripada kapasitor konvensional [2]. Super Kapasitor mampu menyimpan energi dan melepaskannya secara cepat dengan kapasitas yang sangat besar. Manfaat Super Kapasitor sendiri adalah sanggup meredam osilasi saat terjadi gangguan pada sistem. Selain itu Super Kapasitor dapat menambah nilai CCT sehingga kestabilan sistem dapat lebih terjamin.

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada Tugas Akhir ini adalah menentukan nilai *Critical Clearing Time* dengan metode *Critical Trajectory* pada sistem multimesin IEEE Fouad-Andersen 3 Generator

dan 9 Bus. Pertama, dilakukan *running* transien pada sistem setelah diberi gangguan dan dicari nilai CCT-nya. Setelah itu dilakukan analisa apakah sistem tersebut mampu mempertahankan kestabilannya setelah terjadi gangguan. Selanjutnya, untuk menambah nilai CCT agar waktu operasi sistem pengaman lebih lama, Super Kapasitor akan ditambahkan dengan menentukan nilai optimumnya. Permasalahan selanjutnya dilakukan analisa penambahan nilai CCT dengan ditambahkannya koefisien *Damping*, sehingga nantinya akan dibandingkan dengan sistem yang tidak menggunakan *Damping*. Namun penambahan Super Kapasitor pada Tugas Akhir ini tidak mempertimbangkan *control* dari Super Kapasitor dan *rating* yang ada di pasaran.

1.3. Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini adalah untuk memperoleh nilai *Critical Clearing Time* yang optimum dengan menentukan nilai *Super Capacitor Energy Storage* dan penambahan koefisien *Damping* pada generator, lalu dibandingkan dengan sistem yang tidak ditambahkan koefisien *Damping*.

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini digunakan batasan-batasan masalah antara lain;

1. Simulasi penelitian ini menggunakan perangkat lunak Matlab R2016b
2. Sistem kelistrikan yang digunakan merupakan modifikasi sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus dengan *damping*
3. Koefisien *damping* pada sistem digunakan sebesar 0% (tanpa *damping*), 1% , dan 5%, sehingga digunakan 3 kondisi sistem
4. Pada penelitian ini, kapasitas, harga, dan karakteristik *Supercapacitor Energy Storage* di pasaran diabaikan.
5. *Supercapacitor Energy Storage* dipasang sebesar 1 p.u dengan pengaturan waktu kerja 0.001 detik menggunakan Pengatur SCES yang dimodelkan di dalam perangkat lunak Matlab R2016b dan bentuk matematisnya hanya menyerap daya
6. Nilai CCT yang diperoleh merupakan hasil metode *Critical Trajectory* berdasarkan *Modified Losing Synchronism*

1.5. Metodologi

Pengerjaan dan penulisan penelitian ini, metodologi yang digunakan adalah sebagai berikut;

1.5.1. Studi Literatur

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, dilakukan studi literatur melalui literasi berbagai jurnal, buku, dan media lainnya yang berhubungan tentang kestabilan transien, metode-metode untuk menentukan nilai *Critical Clearing Time*, dan penggunaan *Supercapacitor Energy Storage*.

1.5.2. Pengumpulan Data dan Parameter

Data yang digunakan untuk penulisan Tugas Akhir didapat melalui PLN yang bekerja sama dengan Laboratorium Simulasi. Data yang dibutuhkan adalah sistem kelistrikan multimesin Fouad-Andersen IEEE 3 Generator 9 Bus, data generator, data saluran, dan data beban.

1.5.3. Pemodelan Sistem dan Algoritma Program

Setelah mendapatkan data, pemodelan sistem menggunakan MatLab R2016B untuk menentukan model matematika sistem dan pemodelan pemasangan *Supercapacitor Energy Storage*. Dari pemodelan ini bisa didapatkan alur menghitung nilai *Critical Clearing Time* pada sistem multimesin dengan *Damping* dan nilai *Supercapacitor Energy Storage* untuk meningkatkan stabilitas transien pada sistem.

1.5.4. Simulasi

Pemodelan sistem yang telah dibuat dalam bentuk persamaan disimulasikan untuk mendapat nilai *Critical Clearing Time*. Metode yang digunakan untuk simulasi adalah *Critical Trajectory* berbasis *losing synchronism* yang nantinya akan ditambahkan *Supercapacitor Energy Storage* pada sistem.

1.5.5. Analisa Hasil

Hasil simulasi program nantinya akan dibandingkan nilai *Critical Clearing Time* antara sistem yang memiliki *Damping* saja dengan sistem yang memiliki *Damping* dan ditambah dengan *Supercapacitor Energy Storage*

1.5.6. Penulisan Buku

Setelah semua tahap selesai, maka akan dibuat kesimpulan dari seluruh tahap-tahap penelitian yang nantinya Buku Tugas Akhir akan menjadi laporan dari kegiatan Penelitian Tugas Akhir

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam Penelitian ini, laporan akan ditulis terdiri atas lima bab dengan ututan sebegai berikut;

1.6.1. Bab I

Bab I merupakan pendahuluan yang secara garis besar menjelaskan hal-hal yang berkaitan dengan latar belakang permasalahan, rumusan msalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari penelitian ini.

1.6.2. Bab II

Bab II berisi teori-teori penunjang yang menjadi acuan Penelitian. Adapun teori-teori penunjang tersebut antara lain; teori sistem tenaga listrik secara umum, penjelasan kestabilan transien untuk sistem multimesin, dan efek *Damping* pada sistem kelistrikan khususnya kestabilan transien.

1.6.3. Bab III

Bab III menjelaskan tentang tahap perancangan sistem yang akan digunakan dalam penelitian ini. Mengenai data parameter yang akan digunakan, pemodelan matematika dan algoritma simulasinya. Program yang akan digunakan untuk perancangan simulasi penelitian ini adalah Matlab.

1.6.4. Bab IV

Bab IV berisi hasil simulasi CCT menggunakan metode *critical trajectory* dan metode konvensional TDS pada sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus yang memiliki *Damping* dan analisisnya pada setiap titik gangguan pada sistem.

1.6.5. Bab V

Bab V berisi kesimpulan dari keseluruhan tahap penelitian yang diambil melalui simulasi program dan analisis yang telah dilakukan. Adapun saran yang dapat digunakan sebagai masukan dan sudut pandang lain untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan topik ini

1.7. Relevansi

Hasil yang didapatkan dari Penelitian ini diharapkan dapat membantu berkontribusi terhadap perkembangan teknologi di Indonesia di bidang sistem tenaga listrik, khususnya kestabilan transien sistem tenaga dan pengaruh superkapasitor. Selain itu, Laporan Tugas Akhir ini juga bisa dijadikan referensi bagi yang berminat dan bekeinginan untuk mendalami topik kestabilan transien khususnya sistem multimesin dengan *Damping* di masa yang akan datang.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2
DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Stabilitas pada Sistem Tenaga

Ada banyak macam gangguan yang dapat mengganggu kestabilan sistem tenaga, diantaranya; terputusnya generator akibat hubung singkat, perubahan beban yang terus-menerus, dan gangguan di jaringan transmisi. Menurut referensi [3], stabilitas sistem tenaga adalah kemampuan sistem tenaga lisrik dengan kondisi operasi awal tertentu, untuk mendapatkan kembali kondisi idealnya setelah mengalami gangguan. Suatu sistem tenaga bisa juga dikatakan stabil apabila daya masukan mekanis yabg ada pada *prime mover* generator pembangkit seimbang dengan daya keluaran. Untuk itu, stabilitas sistem tenaga harus dijaga agar dapat menjaga kontinuitas dan reliabilitas sistem. Adapun efek dari mengabaikan stabilitas sistem yaitu terjadinya *blackout* pada sistem tersebut.

Ada beberapa banyak faktor yang memengaruhi kestabilan sistem tenaga. Untuk mempermudah, kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan dalam beberapa bentuk [3], antara lain;

2.1.1. Kestabilan Tegangan

Sistem tenaga listrik harus memiliki kemampuan mempertahankan nilai tegangan setiap bus pada sistem tetap stabil baik dalam kondisi normal maupun setelah terjadinya gangguan, Ketidakstabilan tegangan berbentuk fluktuasi tegangan yang tidak terkontrol, penyebabnya antara lain; gangguan sistem, peningkatan kebutuhan beban, atau perubahan kondisi sistem.

2.1.2. Kestabilan Frekuensi

Mempertahankan frekuensi menjadi hal yang sangat penting dalam menjaga kestabilan sistem tenaga. Ketidakstabilan frekuensi terjadi akibat terjadinya gangguan pada sistem. Setelah terjadi gangguan, frekuensi belum tentu kembali ke kondisi semula, maka dari itu mempertahankan frekuensi menjadi permasalahan yang patut diperhatikan.

2.1.3. Kestabilan Sudut Rotor

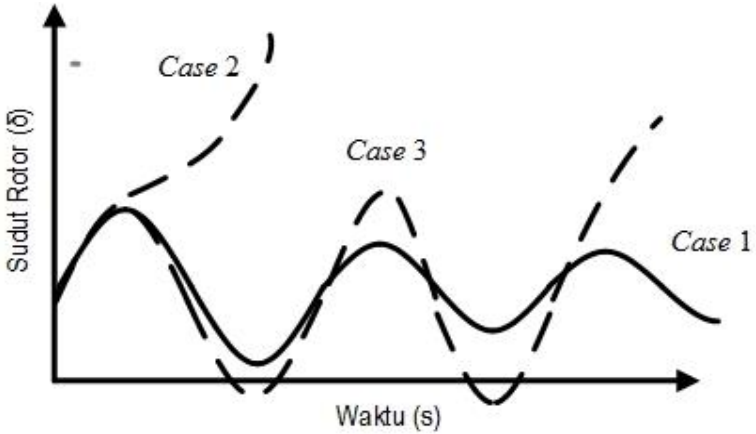
Mesin-mesin sinkron yang terkoneksi dalam sistem harus memiliki kemampuan mempertahankan kestabilan sudut rotor, terutama saat terjadi

gangguan. Kestabilan sudut rotor bergantung juga pada sistem dalam mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik dari mesin-mesin sinkron [4].

2.2. Kestabilan Transien

Terputusnya aliran dari generator ke sistem akibat hubung singkat dan fenomena *starting motor* dapat mengakibatkan perubahan daya yang cukup dinamis dan mendadak, oleh sebab itu dua keadaan tersebut menjadi beberapa penyebab terjadinya kegagalan sistem untuk mempertahankan kestabilan transiennya. Kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan ataupun sinkronisasinya agar tidak lepas saat terjadi gangguan secara tiba-tiba selama sekitar satu ayunan atau biasa disebut *first swing* ketika AVR dan governor belum bekerja disebut kestabilan transien [5]. Analisisnya menjadi penting karena perlu dilakukan saat terjadi gangguan pada sistem seperti saat hubung singkat misalnya.

Setiap mesin sinkron memiliki torsi mekanik dan torsi elektromagnetik yang dijaga keseimbangannya agar tidak lepas sinkron. Namun dalam menjaga keseimbangan tersebut tegantung pada kondisi awal dan besarnya gangguan [4], Perbedaan antara torsi mekanik dan torsi elektromagnet akan mengakibatkan percepatan atau perlambatan rotor mesin sinkron berputar. Apabila terjadi percepatan putaran rotor, sudut rotor akan menjadi lebih besar. Begitupun sebaliknya apabila terjadi perlambatan maka sudut rotor akan menjadi kecil. Kondisi sistem bisa dikatakan stabil apabila osilasi pada sudut rotor mengalami penurunan osilasi. Osilasi yang terus meningkat akan menyebabkan sistem tidak stabil sehingga akan hilang sinkron. Permasalahan kestabilan sudut rotor inilah yang akan dibahas pada buku ini. Berikut ilustrasinya sesuai sumber [6].



Gambar 2.1 Respon sudut rotor terhadap gangguan

Menurut Gambar 2.1 terdapat tiga garis yang menunjukkan kondisi stabil dan tidak stabil. Pada *case* 1 atau garis 1 menunjukkan sudut rotor sempat mengalami isolasi yang meningkat cukup tinggi namun kembali turun bertahan stabil sampai kondisi *steady state*. Pada *case* 2 atau garis 2 menunjukkan sistem tidak stabil osilasi meningkat, sudut rotor meningkat hingga sistem lepas sinkron. Untuk *case* 3 menunjukkan ayunan pertama stabil namun seiring berjalannya waktu menjadi tidak stabil karena bertambahnya isolasi di akhir.

2.3. Persamaan Ayunan

Dinamika sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan perlu dimodelkan dalam bentuk matematika untuk menggambarkan kondisinya, model matematika yang dimaksud ialah persamaan ayunan. Persamaan ayunan berhubungan dengan pergerakan rotor generator akibat torsi inersia dari resultan torsi mekanis dan torsi elektris.

$$J\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \qquad \textbf{(2.1)}$$

Keterangan:

T_m : Torsi mekanis
T_e : Torsi Elektris
θ_m : Pergeseran sudut rotor mekanis (radian)
T_a : Torsi percepatan (Nm)

J : Momen inersia (kgm^2)
t : Waktu (detik)

Apabila T_m dan T_e dianggap positif untuk generator sinkron, berarti variabel T_m adalah resultan memomen putar poros yang cenderung mempercepat putaran rotor dalam arah θ_m yang positif. Karena θ_m diukur terhadap sumbu diam pada stator, maka posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron dapat ditulis dengan persamaan

$$\omega_m = \omega_{Sm} t + \delta_m \qquad \textbf{(2.2)}$$

Sehingga kecepatan putaran rotor memiliki persamaan

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{Sm} t + \frac{d\delta_m}{dt} \qquad \textbf{(2.3)}$$

Keterangan
ω_m : Kecepatan sinkron (radian)
δ_m : Pergerseran sudut rotor terhadap sumbu putar dalam kecepatan sinkron
$\frac{d\delta_m}{dt}$: Penyimpangan kecepatan rotor (rad/detik)

Maka persamaan 2.1 dapat diubah menjadi persamaan

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \qquad \textbf{(2.4)}$$

Jika persamaan 2.4 dikalikan dengan ω_m, maka

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = (T_m - T_e)\omega_m = \omega_m T_m - \omega_m T_e \qquad \textbf{(2.5)}$$

Dengan kecepatan putar dikali torsi adalah daya dan $J\omega_m$ adalah Momen sudut rotor dinyatakan dengan variabel M, maka persamaan bisa ditulis

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \qquad \textbf{(2.6)}$$

Persamaan di atas merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika perputaran pada mesin sinkron dalam studi kestabilan.

2.4. *Critical Clearing Time*

Jika terjadi sebuah gangguan pada sistem, maka gangguan tersebut harus segera diisolir. Namun, untuk menjaga sistem tetap stabil,

pemutusaan harus dilakukan sebelum menyentuh waktu kritis. Waktu kritis yang digunakan untuk batas operasi dari suatu sistem

proteksi untuk mengisolasi gangguan yang terjadi disebut *Critical Clearing Time* [7].

Tabel 2.1 Waktu Pemutusan Rele

Operasi Rele	Tipe Rele	
	Statik	Elektromekanik
Waktu CB Terbuka	0.08	0.08
Rele Overtravel	0.00	0.10
Toleransi Rele dan *Setting Error*	0.12	0.12
Total CTI	0.20	0.30

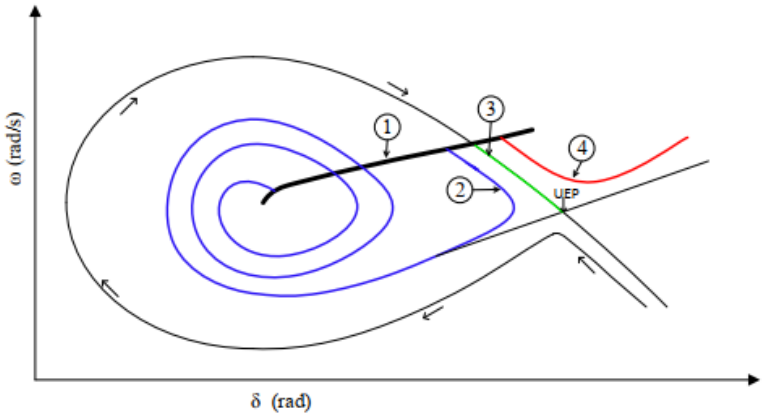
Nilai CCT yang tepat akan membuat sistem akan kembali stabil atau tidak saat setelah terjadinya gangguan. Jika waktu pemutusan dilakukan sebelum CCT, maka sistem akan stabil. Apabila sistem diputus sesudah CCT akan menyebabkan generator menjadi lepas sinkronisasinya dan sistem menjadi tidak stabil. Sebelum *Circuit Breaker* bekerja, rele berfungsi untuk mendeteksi gangguan sebelum memberi perintah ke *Circuit Breaker* untuk memutus.

2.5. *Critical Trajectory*

Critical Trajectory adalah lintasan yang dimulai dari titik *fault-on trajectory* pada CCT dan mencapai titik kritis yang terjadi kehilangan sinkronisasi [1]. Metode ini digunakan untuk meminimalisir masalah yang terjadi saat menghitung nilai *Unstable Equilibrium Point* (UEP).

Gambar 2.2 merupakan lintasan dari *critical trajectory*. Lintasan 1 adalah lintasan saat terjadi gangguan (*fault-on trajectory*) dimulai dari *Stabil Equilibrium Point* hingga gangguan diputus. Lintasan 2 adalah lintasan saat dimana sistem sudah mencapai kestabilan karena gangguan dihilangkan sebelum CCT. Lintasan 4 adalah saat sistem tidak stabil,

dimana waktu pemutusan melebihi nilai CCT. Lintasan 3 merupakan lintasan kritis kestabilan sistem, sesuai yang tertera pada sumber [1].



Gambar 2.2 Bentuk lintasan kritis

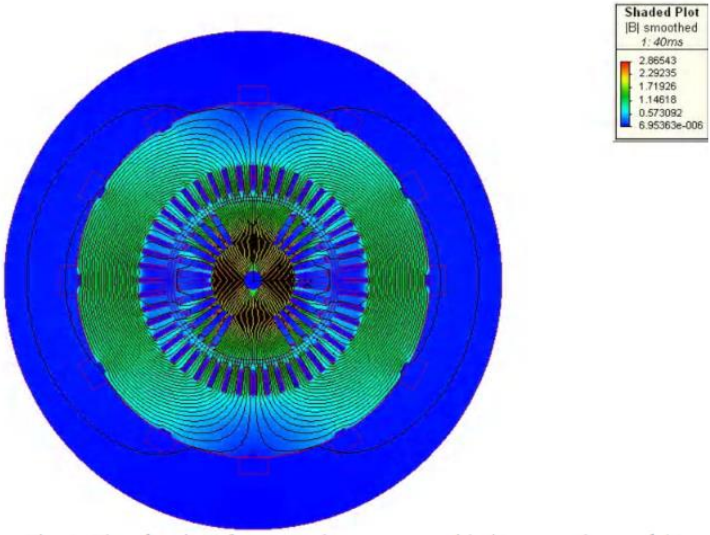
2.6. *Supercapacitor Energy Storage*

Karena gangguan pada sistem kelistrikan berselang dengan waktu yang relatif singkat, maka diperlukannya alat yang bekerja secara cepat pula. *Supercapacitor Energy Storage* atau yang bisa kita singkat dengan SCES merupakan suatu alat penyimpan energi yang memiliki kapasitansi yang besar, kepadatan energi tinggi, pengisian dan pengosongan yang sangat cepat dibanding kapasitor maupun peralatan penyimpan energi konvensional lainya [8]. SCES ini nantinya akan digunakan dalam penelitian ini sebagai penyimpan energi pada sistem yang mengalami gangguan dengan cara meredam isolasi yang timbul ketika terjadi gangguan tiga fasa. Menurut penelitian [9], kemampuan respon super kapasitor yang lebih cepat dibandingkan dengan *speed governor* dan AVR, itu adalah sebab mengapa SCES yang dipilih dalam penelitian ini.
Cara kerja SCES bisa disederhanakan seperti berikut;

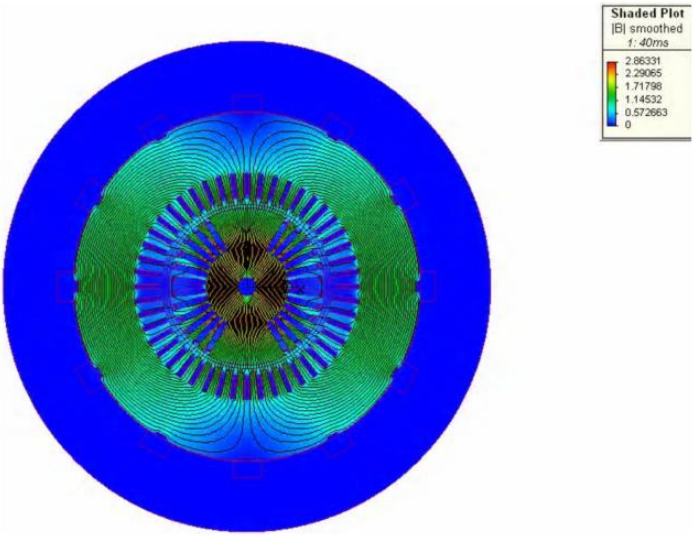
1. Terjadi gangguan sistem sehingga lepas beban terjadi.
2. SCES berada dalam posisi mengisi sampai penuh.
3. Energi berlebih pada sistem terserap.
4. Sistem kembali ke keadaan normal dan *steady state*
5. Energi yang diserap dikeluarkan dan tegangan SCES kembali normal

2.7. *Damper Winding*

Jika suatu sistem mengalami suatu gangguan, tidak jarang sistem tersebut akan mengalamai osilasi. Osilasi yang terjadi bisa dalam bentuk tegangan maupun arus, osilasi bisa terjadi karena garis medan magnet pada stator generator tidak rapat. Oleh sebab itu adanya osilasi pada generator akan menyebabkan rugi-rugi daya yang besar, berikut ilustrasinya [10].



Gambar 2.3 Fluks pada stator generator tanpa *Damper Winding*



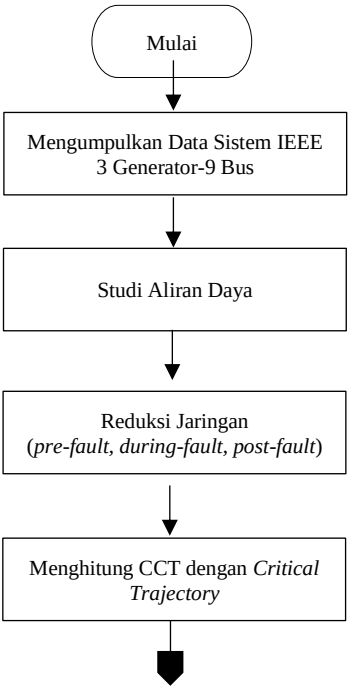
Gambar 2.4 Fluks pada stator generator dengan *Damper Winding*

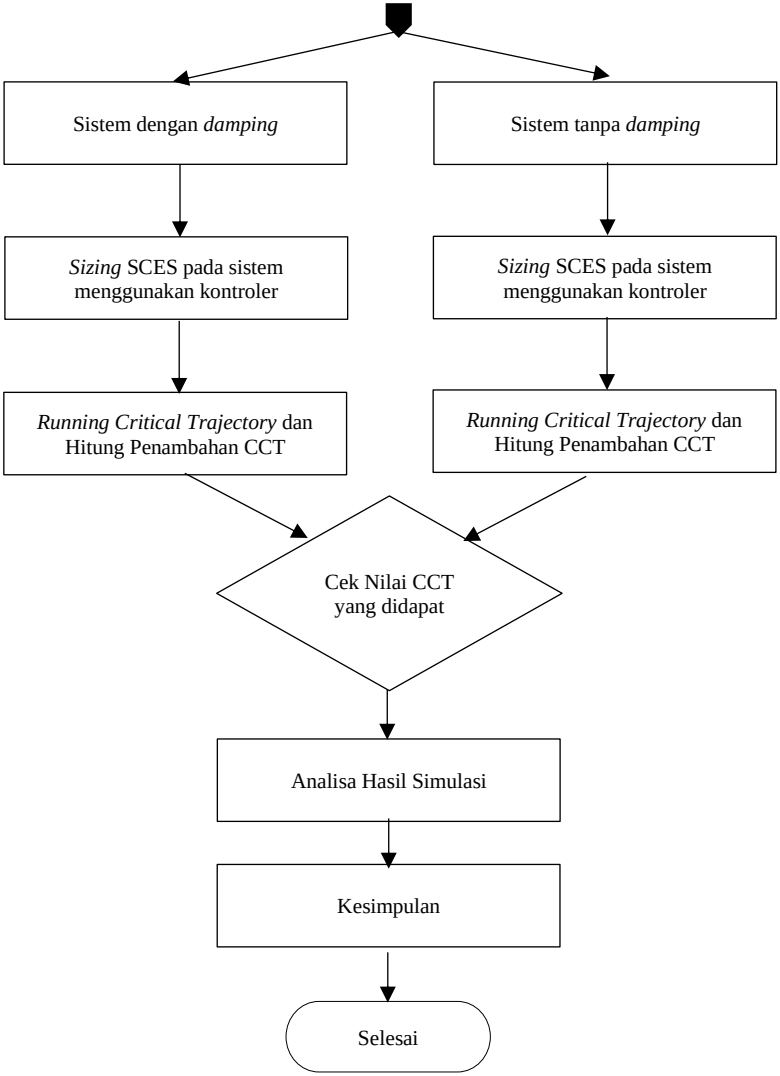
Adanya belitan tambahan yang digunakan untuk merapatkan fluks pada generator diharapkan dapat mengurangi osilasi yang muncul saat terjadi gangguan pada sistem. Dengan adanya *Damper Winding* pada rotor ataupun stator, komponen tersebut digunakan untuk meredam osilasi pada generator saat terjadi gangguan pada sistem tenaga. Namun karena sejak awal *damper winding* hanya bisa diteliti melalui simulasi baik dalam kondisi sistem stabil maupun tidak stabil dengan memasukkan parameter-parameternya, dengan hasil simulasi penelitian yang ada, menunjukkan bahwa belitan generator yang memiliki *damper winding* memiliki arus yang lebih baik daripada belitan yang tidak memiliki belitan peredam [11]. Dengan kemampuannya untuk meredam osilasi, adanya *damper winding* bisa menjadi solusi untuk menjaga kestabilan sistem selain menambahkan *Supercapacitor Energy Storage* untuk menambah nilai *Critical Clearing Time* pada sistem.

BAB 3
PEMODELAN SISTEM DAN METODOLOGI PENELITIAN

Pada tugas akhir ini akan dilakukan perbaikan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus yang memiliki koefisien *damper winding*. Nilai *Critical Clearing Time* sistem saat sebelum dan sesudah pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) diperoleh dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*. Setelah didapatkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT), nantinya *Supercapacitor Energy Storage* dipasang di salah satu bus generator yang dipilih.

3.1. Metodologi Penelitian

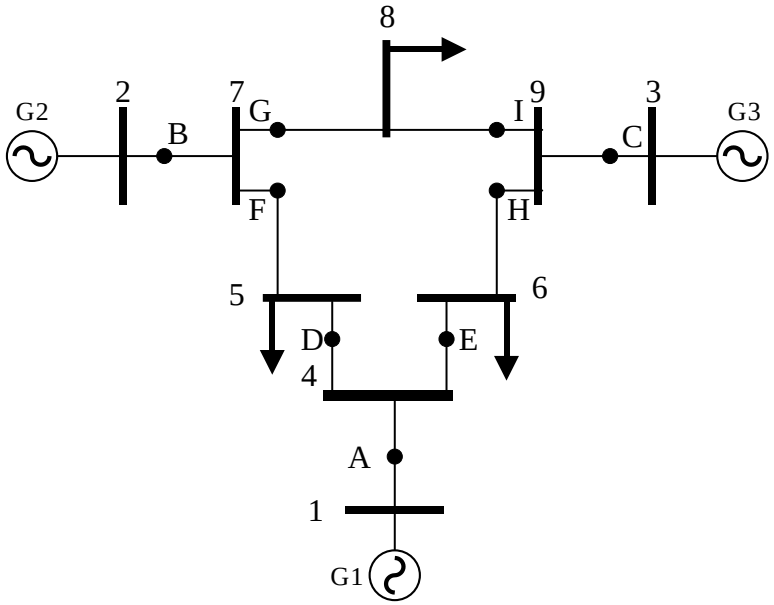




Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

3.2. Data Sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus

Dalam simulasi ini diasumsikan bahwa setiap saluran transmisi terdiri saluran ganda. Untuk sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus ini telah ditentukan sembilan titik lokasi terjadinya gangguan dan terjadi gangguan berupa gangguan tiga fasa (seimbang) pada sebuah titik yang letaknya dekat dengan bus pada saluran paralel. Generator yang berfungsi sebagai *swing/slack* bus adalah generator 1 dan asumsi jenis beban statis terpasang di bus 4, bus 6, dan bus 8.



Gambar 3.2 Sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus

Keterangan:

- A : Titik gangguan antara bus 1 dan bus 4
- B : Titik gangguan antara bus 2 dan bus 7
- C : Titik gangguan antara bus 3 dan bus 9
- D : Titik gangguan antara bus 4 dan bus 5
- E : Titik gangguan antara bus 4 dan bus 6
- F : Titik gangguan antara bus 5 dan bus 7

- G : Titik gangguan antara bus 7 dan bus 8
- H : Titik gangguan antara bus 6 dan bus 9
- I : Titik gangguan antara bus 8 dan bus 9

Untuk spesisifikasi data bus sistem dan saluran tercantum dalam tabel di bawah ini.

Tabel 3.1 Data Transmisi Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus

No.	Saluran	R(p.u.)	X(p.u.)	Y(p.u.)
1	1-4	0.0000	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 3.2 Data Bus Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus

No. Bus	Tegangan Bus	Pembangkitan		Beban	
		P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1.040	200.000	0.000	0.000	0.000
2	1.025	163.000	0.000	0.000	0.000
3	1.025	85.000	0.000	0.000	0.000
4	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	1.000	0.000	0.000	125.000	50.000
6	1.000	0.000	0.000	90.000	30.000
7	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.000	0.000	0.000	100.000	35.000
9	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3.3. Aliran Daya

Sebelum memperoleh atau menghitung *Critical Clearing Time* (CCT) sistem, terlebih dulu dilakukan studi aliran daya pada sistem untuk mendapatkan daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dari pembangkit ke beban serta besar tegangan tiap bus dan arus tiap saluran. Dari parameter-parameter yang didapatkan akan dilakukan ke proses iterasi selanjutnya dan hasilnya digunakan sebagai kondisi inisial untuk kestabilan transien. Langkah awal untuk aliran daya adalah dengan membaca admintansi antar bus yang dituliskan dalam matriks di bawah,

$$Ybus = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1j} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ij} \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.1)}$$

Jika admitansi sudah didapat, langkah selanjutnya adalah menghitung persamaan aliran daya dengan persamaan,

$$P_i - jQ_I = \Sigma_i^n \Sigma_j^n V_i^* V_j Y_{ij} \quad \textbf{(3.2)}$$

Keterangan:

P_i : Daya aktif terbangkit bus ke-i
Q_I : Daya reaktif terbangkit bus ke-j
Y_{ij} : Admitansi anatara bus-i dan bus-j
V_i : Magnitud tegangan bus-i
V_j : Magnitud tegangan bus-j

Menghitung aliran daya pada penelitian ini menggunakan Newton Raphson sebagai metode perhitungan karena metode ini merupakan hasil pengembangan dari deret Taylor yang digunakan untuk mendapatkan turunan persamaan matematik. Jacobian Matrix digunakan dalam perhitungan dalam metode ini dalam setiap iterasinya.

Pemodelan metode ini pengembangan dari deret Taylor, maka digunakan pendekatan yang didefinisikan seperti,

$$F(x) = F(x_0) + \frac{1}{1!} + \frac{dF(x_0)}{dx}(x - x_0) + \frac{1}{2!}\frac{d^2F(x_0)}{dx^2}(x - x_0)^2 + \cdots + \frac{1}{n!}\frac{d^nF(x_0)}{dx^n}(x - x_0)^n = 0 \quad \textbf{(3.3)}$$

Dengan analisis daya aktif dan daya reaktif pada persamaan 3.2, persamaan sistem dapat ditulis dalam bentuk polar menjadi,

$$P_i = \Sigma_i^n \Sigma_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad \textbf{(3.4)}$$

$$P_i = \Sigma_i^n \Sigma_j^n |V_i V_j Y_{ij}| [\cos(\delta_i - \delta_j) \cos(\theta_{ij}) + \sin(\delta_i - \delta_j) \sin(\theta_{ij})] \quad \textbf{(3.5)}$$

Dengan

$G_{ij} = |Y_{ij}| cos\theta_{ij}$, merupakan konduktansi saluran
$B_{ij} = |Y_{ij}| sin\theta_{ij}$, merupakan suseptansi saluran
maka,

$$P_i = \Sigma_i^n \Sigma_j^n \left|V_i V_j\right| \cos\left(\delta_i - \delta_j\right) G_{ij} + \sin(\delta_i - \delta_j) B_{ij}] \quad \textbf{(3.6)}$$

dan daya reaktif bisa dituliskan

$$Q_i = \Sigma_i^n \Sigma_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin\left(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}\right) \quad \textbf{(3.7)}$$

$$Q_i = \Sigma_i^n \Sigma_j^n \left|V_i V_j\right| \left[\sin\left(\delta_i - \delta_j\right) Y_{ij} \cos(\theta_{ij}) + \cos(\delta_i - \delta_j)\, Y_{ij} \sin(\theta_{ij})\right] \quad \textbf{(3.8)}$$

Maka

$$Q_i = \Sigma_i^n \Sigma_j^n \left|V_i V_j\right| \sin\left(\delta_i - \delta_j\right) G_{ij} + \cos(\delta_i - \delta_j) B_{ij}] \quad \textbf{(3.9)}$$

Tahap berikutnya, menentukan perubahan nilai daya aktif dan daya reaktif terhadap sudut tegangan tiap bus menggunakan matriks Jacobian.

$$Jacobian\ Matrix = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad \textbf{(3.10)}$$

Dengan,

$$H_{ij} = \Sigma_i^n \Sigma_j^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad \textbf{(3.11)}$$

$$N_{ij} = \Sigma_i^n \Sigma_j^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} |\Delta V_j| \quad \textbf{(3.12)}$$

$$J_{ij} = \Sigma_i^n \Sigma_j^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad \textbf{(3.13)}$$

$$L_{ij} = \Sigma_i^n \Sigma_j^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} |\Delta V_j| \quad \textbf{(3.14)}$$

Maka,

$$\begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ J_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \vdots \\ \Delta\delta_n \\ \frac{\Delta V_1}{|V_1|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_n}{|V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}$$

Dari persamaan 3.6 dan 3.9 akan didapatkan nilai P dan nilai Q awal, lali dengan matriks Jacobian akan didapatkan nilai dari $\Delta\delta_i$ dan ΔV_i yang digunakan sebagai nilai sudut dan magnitud tegangan iterasi berikutnya.

$$\delta^{k+1} = \delta^k + \Delta\delta^k \quad \textbf{(3.15)}$$

$$|V|^{k+1} = |V|^k [1 + \frac{\Delta|V|^k}{|V|^k}] \quad \textbf{(3.16)}$$

Tabel 3.3 Hasil iterasi aliran daya pada generator

Gen	Pm (p.u)	V (p.u)	Ea (p.u)
1	0.8691	1.04	1.063
2	1.63	1.025	1.0535
3	0.85	1.025	1.0284

3.4. Reduksi Matriks

Karena sistem yang digunakan cukup kompleks, perhitungan harus diminimalisir dengan mereduksi jaringan dalam perhitungan matematis menggunakan metode Kron. Metode ini digunakan untuk mereduksi matriks yang sudah didapatkan. Metode ini akan mengeliminasi bus yang tidak terhubung beban ataupun generator karena arus injeksi pada bus tersebut bernilai nol.

Elemen matriks admitansi bus yang sudah didapatkan direduksi dengan mengeliminasi bus *p* dihitung dengan persamaan

$$Y_{ij(baru)} = Y_{ij(lama)} - \frac{Y_{ip}Y_{pj}}{Y_{pp}} \qquad \textbf{(3.17)}$$

dengan $i, j = 1, 2, 3, \ldots\ldots n$ dan $i, j \neq p$.

Subskrip *n* merupakan nomor bus beban dan subskrip *m* merupakan bus generator, maka secara sederhana persamaan dapat ditulis

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.18)}$$

Karena tidak ada arus yang masuk ataupun keluar dari bus beban, maka $I_n = 0$.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \qquad \textbf{(3.19)}$$

Dari persamaan di atas dapat diperolah persamaan

$$0 = Y_{nn}V_n + Y_{nm}E_m \qquad \textbf{(3.20)}$$

$$I_m = Y_{nm}^t V_n + Y_{mm}E_m \qquad \textbf{(3.21)}$$

Lalu dioperasikan lagi, menjadi

$$V_n = -Y_{nn}^{-1}Y_{nm}E_m \qquad \textbf{(3.22)}$$

$$I_m = \{Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm}\}E_m \qquad \textbf{(3.23)}$$

$$I_m = Y_{red}E_m \qquad \textbf{(3.24)}$$

$$Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm} = Y_{red} \qquad \textbf{(3.25)}$$

Dengan menggunakan persamaan yang 3.25, maka bentuk matriks menjadi lebih sederhana dan analisis kestabilan transien menjadi lebih mudah.

3.5. Pemodelan

Pada penlitian ini pemodelan sistem multimesin adalah model *Center of Angel* (COA) atau *Center of Inertia* (COI) dengan penambahan *damper winding*. Persamaan dapat dituliskan seperti

$$M_T\delta_0 = \Sigma_{i=1}^{n} M_i\delta_i \qquad \textbf{(3.26)}$$

Dengan $\dot{\delta}_i = \omega_i$ dan $\ddot{\delta}_i = \dot{\omega}_i$, maka persamaan dapat dituliskan menjadi,

$$M_T\dot{\omega}_0 = \Sigma_{i=1}^{n} M_i\dot{\omega}_i \qquad \textbf{(3.27)}$$

$$M_T\dot{\omega}_0 = \Sigma_{i=1}^{n}\{P_{mi} - P_{ei}(\delta)\} \qquad \textbf{(3.28)}$$

$$M_T\dot{\omega}_0 = \Sigma_{i=1}^{n}(P_{mi} - E_i^2 G_{ii}) - 2\Sigma_{i=1}^{n-1}\Sigma_{j=i+1}^{n} E_i E_j G_{ij} cos\delta_{ij} \qquad \textbf{(3.29)}$$

$$M_T\dot{\omega}_0 = P_{COI} \qquad \textbf{(3.30)}$$

$$\dot{\omega}_0 = \frac{P_{COI}}{M_T} \qquad \textbf{(3.31)}$$

$$\dot{\omega}_0 = \dot{\delta}_0$$

Mendefinisikan sudut terbaru dan kecepatan relatif dengan menggunakan persamaan

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 \text{ dan } \widetilde{\omega_i} = \omega_i - \omega_0 \qquad \textbf{(3.32)}$$

Mengacu dari persamaan ayunan, maka persamaan gerak COI dapat ditulis seperti,

$$M_i\left(\dot{\widetilde{\omega_i}} + \dot{\omega}_0\right) = P_{mi} - P_{ei}(\theta) \qquad \textbf{(3.33)}$$

$$M_i\dot{\widetilde{\omega_i}} = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - M_i\dot{\omega}_i \qquad \textbf{(3.34)}$$

$$M_i\dot{\widetilde{\omega_i}} = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T}P_{COI} \qquad \textbf{(3.35)}$$

Karena ada koefisien *damper winding*, maka persamaan menjadi

$$M_i\dot{\widetilde{\omega_i}} = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T}P_{COI} - D_i(\dot{\widetilde{\omega_i}}) \qquad \textbf{(3.36)}$$

$$\dot{\theta}_i = \widetilde{\omega_i}$$

Dimana:

M_i : Momen inersia generator ke-i
M_T : Momen inersia total
ω_i : Kecepatan sudut rotor generator ke-i
P_{mi} : Daya mekanik generator ke-i

P_{ei} : Daya elektris generator ke-i
θ_i : Penyimpangan sudut rotor generator ke-i
D_i : Koefisien *damping* generator ke-i

3.6. Metode Runge-Kutta

Metode Runge-Kutta orde 4 merupakan sebuah metode numerik untuk memperoleh *fault-on-trajectory* pada lintasan *Stable Equivalent Point* sebelum dan ketika gangguan [12].

$$K_1 = f(x)dt \quad \textbf{(3.37)}$$

$$K_2 = f\left(x + \frac{1}{2}k_1\right)dt \quad \textbf{(3.38)}$$

$$K_3 = f\left(x + \frac{1}{2}k_2\right)dt \quad \textbf{(3.39)}$$

$$K_4 = f(x + k_3)dt \quad \textbf{(3.40)}$$

$$x = x + \frac{1}{6} + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad \textbf{(3.41)}$$

Keterangan
K_1 : Lengkungan awal *time-step*
K_2 : Pendekatan pertama lengkungan pada pertengahan *time-step*
K_3 : Pendekatan kedua lengkungan pertengahan *time-step*
K_4 : Lengkungan terakhir *time-step*

3.7. Perumusan Masalah

3.7.1. Definisi Awal

Jika suatu sistem mengalami ketidakstabilan, permasalahan tersebut bisa dianalisis melalui kondisi awal sebelum terjadi gangguan, selama gangguan dan setelah terjadiya gangguan. Kondisi sistem di awal sebelum terjadi gangguan didefinisikan x_{pre} dan terjadi gangguan saat t=0. Kemudian sistem berubah mengikuti respon sistem selama terjadinya gangguan yang bisa ditunjukkan oleh persamaan

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad \textbf{(3.42)}$$

Yang mana $x \in R^N$, $t \in R$, $f_F: R^N \rightarrow R^N$
Hasil dari perhitungan di atas adalah kurva lintasan terjadinya gangguan (*fault-on-trajectory*) dan dapat ditulis dengan persamaan

$$x(t) = X_F\left(t; x_{pre}\right), 0 \leq t \leq \tau \quad \textbf{(3.43)}$$

Yang mana $X_F\left(t; x_{pre}\right): R^N \rightarrow R^N$

Gangguan pada sistem kemudian diputus saat $t = \tau$ dan sistem bisa ditulis dengan persamaan

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty, f: R^N \rightarrow R^N \quad \textbf{(3.44)}$$

Hasil dari perhitungan di atas merupakan lintasan setelah terjadinya gangguan dan dapat ditulis dengan persamaan

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty;\ X(t; x^0: R^N \rightarrow R^N) \quad \textbf{(3.45)}$$

Dengan catatan kondisi x^0 adalah titik pada lintasan kritis terjadinya gangguan saat waktu τ gangguan hilang

$$x^0 = X_f(\tau, x_{pre}) \quad \textbf{(3.46)}$$

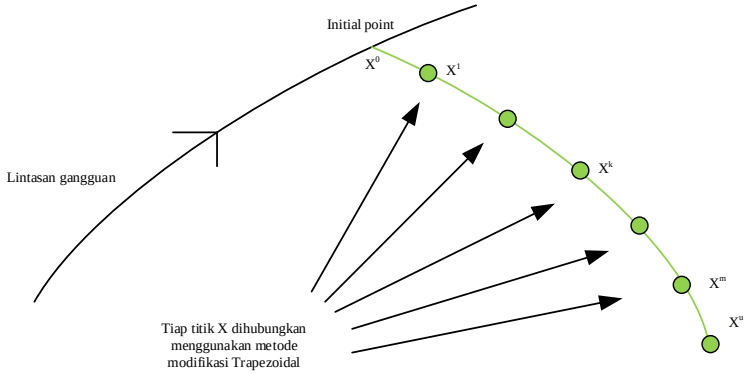
3.7.2. Metode Modifikasi Persamaan Trapezoidal [1]

Penggunaan metode ini merupakan salah satu tahap untuk memperoleh lintasan kritis. Perhitungan trapezoidal digunakan untuk persamaan 3.44 pada saat t^k dinotasikan dengan x^k, sehingga persamaan trapezoidal konvensional bisa ditulis menjadi

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(x^{k+3} + x^k)(t^{k+1} - t^k) \quad \textbf{(3.47)}$$

Dimana $x^k = f(x^k)$

Superskrip k digunakan untuk menyatakan jumlah iterasi ke-berapa terhadap waktu sesuai dengan definisi *critical trajectory* yaitu lintasan yang dimulai dari lintasan gangguan sampai titik kritis. Penggunaan metode ini menitik beratkan pada kondisi ketika gangguan hilang saat CCT dan variabel lainnya pada kondisi kritis. Berikut ilustrasi konsep persamaan trapezoidal sesuaii sumber [4].



Gambar 3.3 Konsep Persamaan Trapezoidal [4]

Gambar 3.3 menunjukkan lintasan kritis yang dimulai dari x^0, yaitu saat pemutusan gangguan pada CCT dan x^u, yaitu kondisi kritis atau mencapai *Unstable Equilibrium Point* atau UEP. Karena waktu yang dibutuhkan untuk mencapai UEP nilainya tidak terbatas, lintasan kritis menjadi sulit diperoleh. Untuk mengatasi masalah pehitungan dengan batas waktu tidak terhingga, digunakan metode integrasi numerik baru yang dijelaskan sebagai berikut:

Jarak antara dua titik pada persamaan 3.47 didefinisikan melalui persamaan

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2}(x^{k+3} + x^k)(t^{k+1} - t^k) \qquad \textbf{(3.48)}$$

Kemudian, durasi waktu diubah menjadi jarak dan ditulis dengan persamaan

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|x^{k+1} + x^k|}\varepsilon \qquad \textbf{(3.49)}$$

Untuk mendapatkan persamaan bentuk, persamaan 3.49 disubtitusikan ke dalam persamaaan 3.47, sehingga persamaan menjadi

$$x^{k+1} - x^k = \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|}\varepsilon = 0 \qquad \textbf{(3.50)}$$

Persamaan di atas membuat integrasi numeri terhadap waktu dapat ditransformasikan ke dalam fungsi jarak. Transformasi ini

memungkinkan sebagai representasi lintasan kritis dengan sejumlah titik yang jaraknya sama.

3.7.3. *Critical Trajectory* dengan Metode *Losing Synchronism*

Perumusan masalah untuk mendapatkan kondisi kritis sebagai titik akhir kestabilan transien ditunjukkan dengan persamaan

$$\min_{x^0,x^1,\ldots,x^{m+1},\varepsilon,\tau,Ks,v} \{\sum_{k=0}^{m}(\mu^k)'(\mu^k) + (\mu^{m+1})'W(\mu^{m+1})\} \qquad \textbf{(3.51)}$$

yang mana $x^k \in R^N,\ \varepsilon \in R,\ \tau \in R,\ Ks \in R, v \in R^{NGen}$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k \frac{x^{k+1}+x^k}{|x^{k+1}+x^k|}\varepsilon \qquad \textbf{(3.52)}$$

$$x^k = f(x^k) \qquad \textbf{(3.53)}$$

dengan batasan

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \qquad \textbf{(3.54)}$$

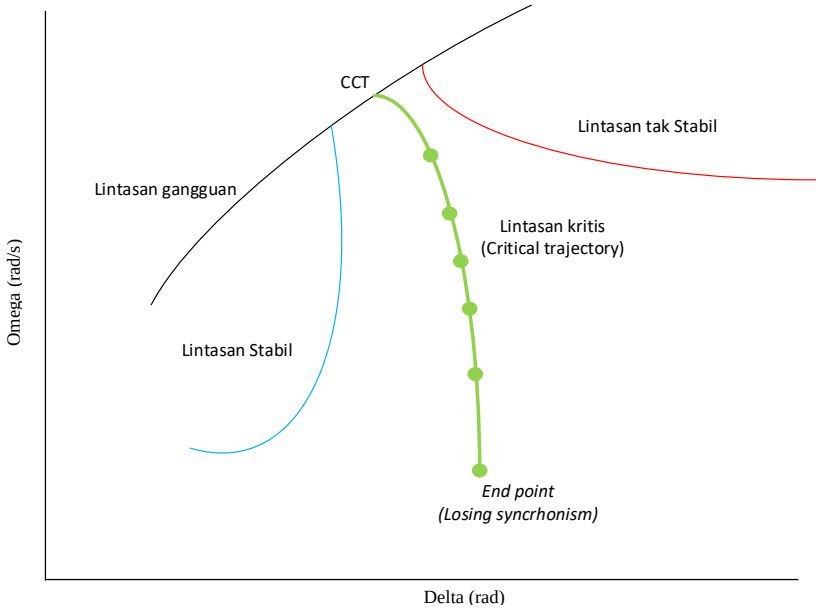
$$\mu^{m+1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}}.v \\ v - Ks.\dot{\theta}^{m+1} \\ |v| - 1 \end{bmatrix} = 0 \qquad \textbf{(3.55)}$$

Dimana koefisien W adalah matriks pembobotan berbentuk persegi dengan elemen diagonal bernilai positif dan tidak memengaruhi konvergensi hasil yang diperoleh. Oleh karena itu matriks identitas digunakan pada W. Setelah minimalisasi pada persamaan 3.51 menghasilkan $\mu^k = 0$, dimana persamaan trapezoidal digunakan untuk menghubungkan semua titik x^k, mulai dari k=0 hingga k=(m+1) seperti yang terlihat pada gambar 3.3. Persamaan 3.54 merupakan kondisi batasan untuk titik awal x^0, dimana juga menunjukkan lintasan gangguan sebagai fungsi waktu pemutusan (τ). Sedangkan persamaan 3.55 adalah kondisi untuk titik akhir, dimana θ^{m+1} memenuhi kondisi kritis sinkronisasi.

3.8. Menentukan Nilai *Critical Clearing Time*

Nilai waktu pemutusan kritis adalah titik awal pada lintasan kritis pada lintasan gangguan, dimana hal ini dapat diketahui sistem kembali stabil apabila gangguan diputus sebelum mencapai waktu pemutusan kritis dan sistem akan tidak stabil apabila diputus melewati waktu tersebut. Akurasi dari lintasan kritis ini dapat ditentukan oleh *m* dan besar nilai.

Kondisi batas akhir pada metode ini adalah tambahan dari metode konvensional yang digunakan sebagai formulasi awal pada metode ini. Metode konvensional tersebut ialah *numerical integration*. Dalam metode tersebut, kesalahan atau *error* μk diakumulasikan seiring bertambahnya k sehingga xu atau titik akhir memiliki kesalahan yang cukup besar. Namun dalam metode *losing synchronism* ini, sesuai persamaan yang dihasilkan untuk titik akhir, menyelesaikan persamaan berlebih dengan meminimalisasi sehingga *error* μk tersebar di setiap titik merata, dan titik akhir memiliki kesalahan kecil. Untuk lebih jelasnya, ilustrasi konsep CCT ditunjukkan sesuai sumber [4].



Gambar 3.4 Konsep CCT [4]

3.9. Modifikasi Sistem dengan Penambahan *Supercapacitor Energy Storage*

Ketika sistem mengalami gangguan tiga fasa, osilasi ayunan pertama akan bernilai sangat besar dan dapat menyebabkan peningkatan nilai sudut rotor generator sehingga sistem berpotensi kehilangan sinkron.

Pemasangan SCES dalam sistem dapat meredam osilasi akibat gangguan tersebut. Pada penelitian ini, SCES diatur dengan algoritma khusus sebagai *controller* dan di dalamnya terdapat parameter waktu yang akan memengaruhi kerja SCES dalam kestabilan transien. Waktu kerja SCES akan memengaruhi nilai *critical clearing time* yang didapat dalam analisisnya.

Dalam penelitian ini *Supercapacitor Energy Storage* atau SCES diasumsikan sudah terpasang di bus generator secara paralel dan di dalamnya sudah terdiri dari *rectifier/inverter* dengan kapasitas 1 p.u atau setara 100MVA. Sedangkan nilai daya SCES akan tergantung dari waktu kerja dari *controller* SCES yang bisa ditulis dengan persamaan [13].

$$P_{sces} = \frac{(P_{mref} - V_{ref} - P_{cref})}{T_c} \quad \textbf{(3.56)}$$

Dengan:

P_{sces} : Daya SCES (p.u)
P_{mref} : Daya mekanik generator referensi/SCES dipasang
V_{ref} : Tegangan referensi SCES
P_{cref} : Konstanta referensi *controller*
T_c : Waktu SCES bekerja

Kemudian dengan persamaan di atas dapat disubtitusikan ke dalam persamaan matematika

$$M_i\dot{\widetilde{\omega_i}} = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - M_i\dot{\omega}_i - P_{sces} \quad \textbf{(3.57)}$$

$$M_i\dot{\widetilde{\omega_i}} = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T}P_{COI} - P_{sces} \quad \textbf{(3.58)}$$

Apabila sistem memiliki koefisien *damping*, maka persamaan menjadi

$$M_i\dot{\widetilde{\omega_i}} = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T}P_{COI} - P_{sces} - D_i(\dot{\widetilde{\omega_i}}) \quad \textbf{(3.59)}$$

Keterangan

M_i : Momen inersia generator ke-i
M_T : Momen inersia total
ω_i : Kecepatan sudut rotor generator ke-i
P_{mi} : Daya mekanik generator ke-i
P_{ei} : Daya elektris generator ke-i
θ_i : Penyimpangan sudut rotor generator ke-i
D_i : Koefisien *damping* generator ke-i

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4
SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab 4 ini berisi hasil simulasi beserta analisis perbaikan *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem Fouad-Anderson 3 generator-9 bus. Diasumsikan setiap saluran transmisi terdiri atas saluran ganda dan terjadi gangguan tiga fasa seimbang pada titik yang letaknya dekat dengan bus pada saluran paralel.

Simulasi dilakukan untuk mendapatkan nilai *Critical Clearing Time* sistem pada saat sebelum pemasangan SCES dan sesudah pemasangan SCES, sistem yang digunakan menggunakan *damping*. Nantinya bisa ditarik kesimpulan melalui komparasi dengan sistem yang tidak menggunakan *damping*. Selain itu, karena keluaran SCES diatur oleh kontroler dengan mengatur waktu SCES bekerja, waktu bekerja inilah yang menjadi penting karena perbedaan waktu bekerja akan terjadi perbedaan daya keluaran SCES itu sendiri. Kapasitas SCES yang digunakan nilainya 1 p.u. setara 100MVA dan dipasang pada bus generator 2 karena memiliki rata-rata kenaikan *Critical Clearing Time* lebih besar [8].

4.1. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* Sebelum Penambahan SCES

Pada simulasi ini, dilakukan pada sistem 3 generator-9 bus dengan tiga kondisi *damping* dan dalam kondisi belum terpasang SCES. Tiga kondisi *damping* tersebut adalah saat tidak memiliki *damping* atau 0%, 1%, dan 5%. Simulasi sebelum dipasangnya SCES dilakukan agar mendapat nilai CCT awal sebagai perbandingan dan acuan di simulasi berikutnya.

Nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* nantinya akan dilakukan komparasi dengan perolehan nilai CCT menggunakan metode konvensional *Time Domain Siulation* (TDS) untuk mengetahui keakuratan hasil yang diperoleh. Metode konvensional merupakan metode perhitungan tidak langsung yang mana hasilnya berupa rentang waktu pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil dan waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode *Critical Trajectory* merupakan perhitungan langsung, sehingga hasil nilai CCT dapat diketahui secara tepat. Tabel-tabel dibawah ini akan menunjukkan hasil

nilai CCT sistem yang dihitung melalui dua metode yaitu *Critical Trajectory* dan konvensional *Time Domain Simulation*.

4.1.1. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 0% Sebelum Penambahan SCES

Pada tabel 4.1 menunjukkan perbandingan hasil *Critical Clearing Time* yang didapatkan melalui dua metode berbeda, yaitu konvensiunal TDS dan *Critical Trajectory*. Seperti yang sudah disampaikan sebelumnya, metode TDS adalah perhitungan dengan hasil berupa rentang waktu pemutusan stabil dan waktu pemutusan tak stabil, sedangkan *critical trajectory* merupakan perhitungan dengan hasil yang langsung.

Tabel 4.1 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan Damping 0% Sebelum Penambahan SCES

Fault	damping	TDS	critical trajectory	error
A	0%	0.34-0.35	0.3425	0
B	0%	0.21-0.22	0.2131	0
C	0%	0.24-0.25	0.2463	0
D	0%	0.32-0.33	0.3261	0
E	0%	0.32-0.33	0.3256	0
F	0%	0.22-0.23	0.2274	0
G	0%	0.23-0.24	0.2321	0
H	0%	0.25-0.26	0.2579	0
I	0%	0.26-0.27	0.2612	0

Hasil perhitungan metode konvensional TDS sendiri akan menjadi acuan hasil dari metode *critical trajectory*. Pada tabel 4.1 diambil contoh titik gangguan A yang memiliki hasil perhitungan metode *critical trajectory* sebesar 0.3425 dan jika dibandingkan dengan hasil perhitungan metode konvensional TDS pada titik gangguan A, terlihat bahwa hasil yang diperoleh berada di antara rentang hasil metode konvensional.

Karena pada hasil metode konvensional apabila CCT berada di nilai 0.34 berarti sistem tersebut stabil dan jika nilai CCT 0.35 sistem tidak stabil.

$$error = \frac{Nilai\ CCT - tcu\ atau\ tcs}{tcu\ atau\ tcs} \times 100\% \qquad \textbf{(4.1)}$$

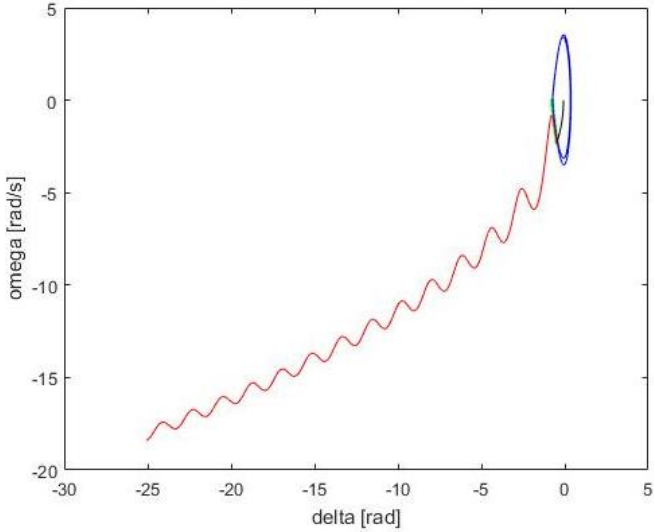
Keterangan,

Nilai CCT	: Hasil CCT metode *critcal trajectory*
tcs	: waktu pemutusan stabil dari metode TDS
tcu	: waktu pemutusan tak stabil dari metode TDS

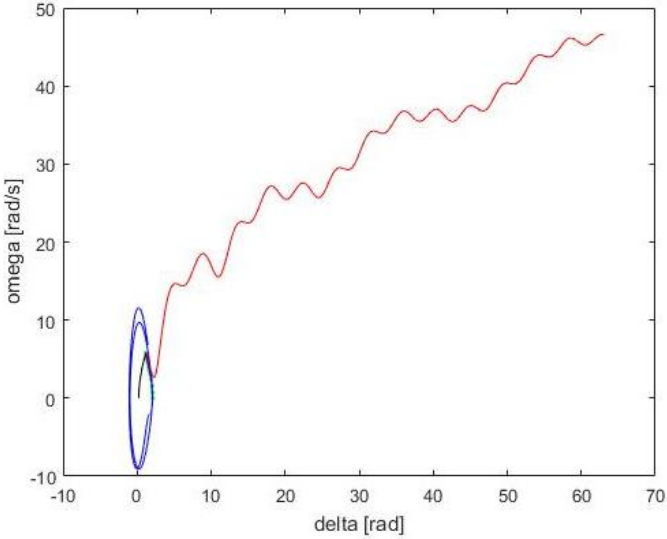
Untuk mendapatkan *error*, digunakan persamaan 4.1 dan terlihat pada tabel tersebut di setiap titik gangguannya tidak terdapat *error*. Besar nilai *error* yang diperbolehkan hanya sebesar ±5% agar nilai CCT hasil dari perhitungan metode *critical trajectory* dapat diterapkan.

4.1.1.1. Analisis Grafik Hasil Simulasi Metode Critical Trajectory pada Titik Gangguan A

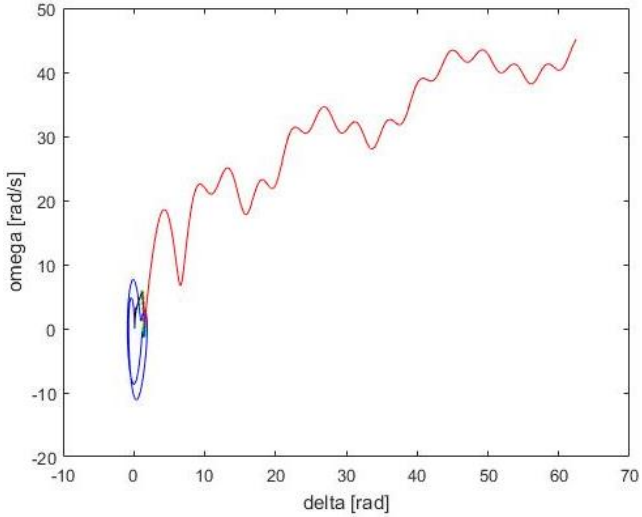
Grafik hasil merupakan *plotting* karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam radian/detik terhadap sudut rotor (δ) dalam radian pada generator. Grafik yang tunjukkan memiliki empat warna, hitam merupakan lintasan saat terjadi gangguan, biru menunjukkan kondisi stabil, merah menunjukkan kondisi tidak stabil, dan hijau menunjukkan kurva hasil CCT yang diperolah melalui metode *critical trajectory*. Di bawah ini ditampilkan grafik pada titik A untuk mewakili salah satu dari keseluruhan simulasi pada titik gangguan. Titik gangguan A pada sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus merupakan simulasi gangguan 3 fasa yang diletakkan pada saluran antara bus 1 dan bus 4. Hasil simulasi menggunakan metode *critical trajectory* bernilai 0.3425, sedangkan metode konvensional didapat hasil dengan rentang nilai 0.34-0.35. Gambar 4.1-4.3 ini merupakan grafik hasil yang didapatkan pada generator 1, generator 2, dan generator 3.



Gambar 4.1 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A



Gambar 4.2 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A



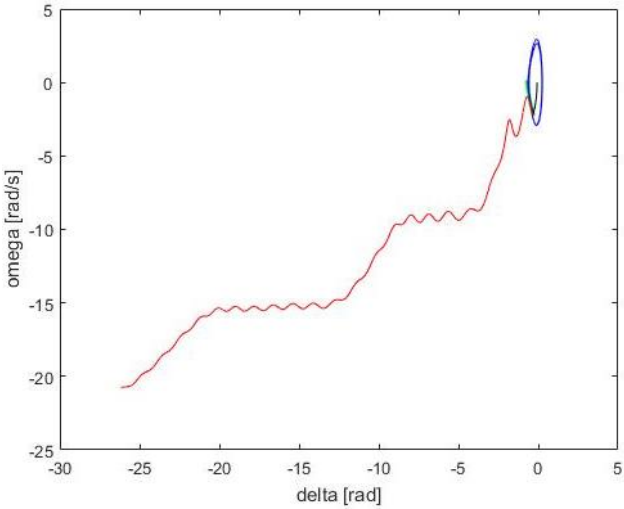
Gambar 4.3 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 3 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A

Apabila melihat gambar 4.1-4.3, terlihat kurva biru menunjukkan rotor berosilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) dan dilakukan pemutusan setelah 0.34 detik. Sedangkan kurva merah menunjukkan jika sistem apabila terjadi gangguan dan diputus setelah 0.35 detik, rotor berisolasi dengan naiknya percepatan seiring bertambahnya pergeseran sudut rotor dan menyebabkan generator menjadi lepas sinkron. Kurva hijau yang merupakan hasil dari metode *critical trajectory* berada diantara kondisi stabil dan tidak stabil, maka dari itu hasil simulasi sesuai dengan metode konvensional.

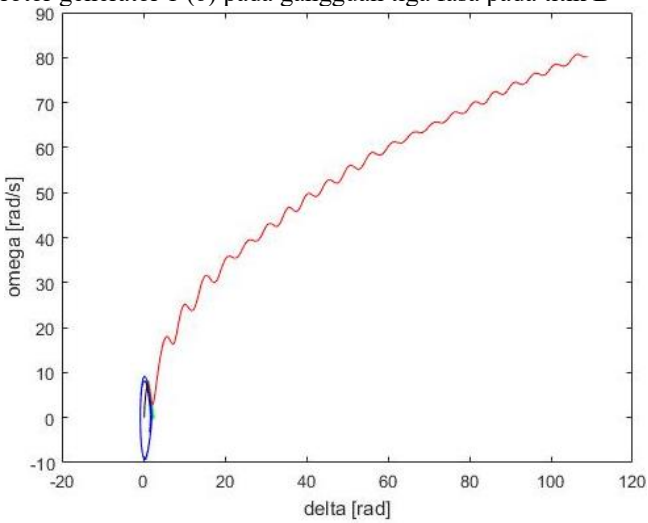
4.1.1.2. Analisis Grafik Hasil Simulasi Metode Critical Trajectory pada Titik Gangguan B

Sama seperti 4.1.1.1, di bawah ini ditampilkan grafik pada titik B untuk mewakili salah satu dari keseluruhan simulasi pada titik gangguan. Titik gangguan B pada sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus merupakan simulasi gangguan 3 fasa yang diletakkan pada saluran antara bus 2 dan bus 7. Hasil simulasi menggunakan metode *critical trajectory* bernilai 0.2131, sedangkan metode konvensional didapat hasil dengan

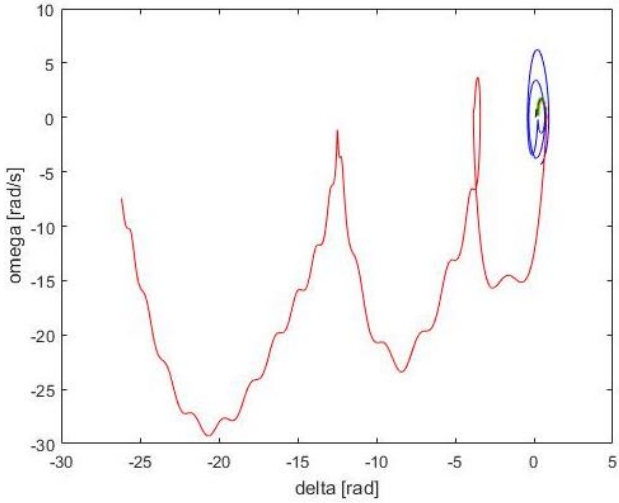
rentang nilai 0.21-0.22. Gambar 4.4-4.6 ini merupakan grafik hasil yang didapatkan pada generator 1, generator 2, dan generator 3.



Gambar 4.4 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B



Gambar 4.5 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B



Gambar 4.6 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 3 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B

Apabila melihat gambar 4.4-4.6, terlihat kurva biru menunjukkan rotor berosilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) dan dilakukan pemutusan setelah 0.21 detik. Sedangkan kurva merah menunjukkan jika sistem apabila terjadi gangguan dan diputus setelah 0.22 detik, rotor berisolasi dengan naiknya percepatan seiring bertambahnya pergeseran sudut rotor dan menyebabkan generator menjadi lepas sinkron. Kurva hijau yang merupakan hasil dari metode *critical trajectory* berada diantara kondisi stabil dan tidak stabil, maka dari itu hasil simulasi sesuai dengan metode konvensional.

4.1.2. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 1% Sebelum Penambahan SCES

Pada tabel 4.2 dibawah ini menunjukkan perbandingan hasil *Critical Clearing Time* yang didapatkan melalui dua metode berbeda, yaitu konvensiunal TDS dan *Critical Trajectory*. Seperti yang sudah disampaikan sebelumnya, metode TDS adalah perhitungan dengan hasil berupa rentang waktu pemutusan stabil dan waktu pemutusan tak stabil, sedangkan *critical trajectory* merupakan perhitungan dengan hasil yang langsung. Perbedaan dari 4.1.1 hanya perbedaan sistemnya karena

ditambahkan penambahan koefisien *damping* sebesar 1%. *Damping* pada sistem sendiri digunakan untuk meredam isolasi akibat gangguan dan *damping* sendiri sudah terpasang secara tetap pada rotor maupun stator di dalam generator.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan Damping 1% Sebelum Penambahan SCES

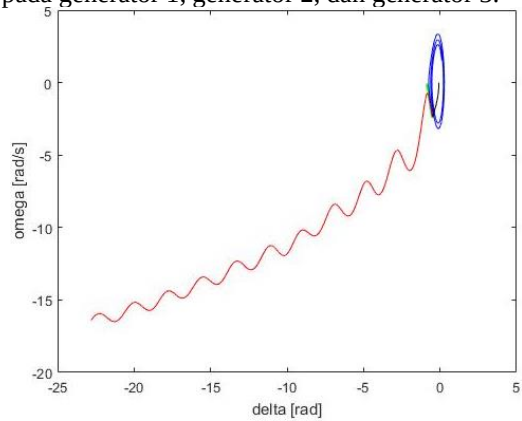
Fault	damping	TDS	critical trajectory	error
A	1%	0.35-0.36	0.3550	0
B	1%	0.21-0.22	0.2191	0
C	1%	0.27-0.28	0.2728	0
D	1%	0.33-0.34	0.3377	0
E	1%	0.33-0.34	0.3370	0
F	1%	0.23-0.24	0.2327	0
G	1%	0.23-0.24	0.2384	0
H	1%	0.26-0.27	0.2717	0
I	1%	0.27-0.28	0.2856	0

Hasil perhitungan metode konvensional TDS sendiri akan menjadi acuan hasil dari metode *critical trajectory*. Pada tabel 4.2 diambil contoh titik gangguan A yang memiliki hasil perhitungan metode *critical trajectory* sebesar 0.3550 dan jika dibandingkan dengan hasil perhitungan metode konvensional TDS pada titik gangguan A, terlihat bahwa hasil yang diperoleh berada di antara rentang hasil metode konvensional. Karena pada hasil metode konvensional apabila CCT berada di nilai 0.35 berarti sistem tersebut stabil dan jika nilai CCT 0.36 sistem tidak stabil. Pada tabel 4.2 juga telihat tidak adanya error pada hasil CCT menggunakan *critical trajectory* dengan metode konvensional.

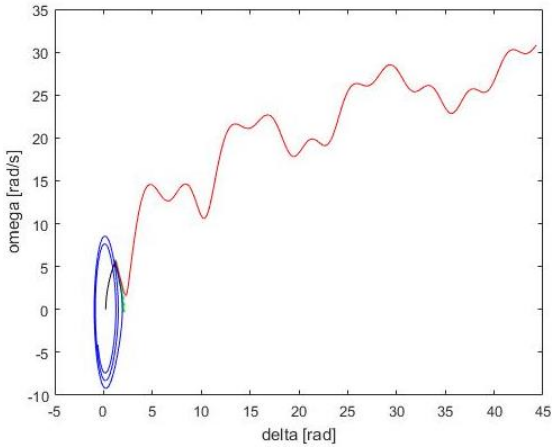
4.1.2.1. Analisis Grafik Hasil Simulasi Metode Critical Trajectory pada Titik Gangguan A

Seperti 4.1.1.1, di bawah ini ditampilkan grafik pada titik A untuk mewakili salah satu dari keseluruhan simulasi pada titik gangguan. Titik gangguan A pada sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus merupakan

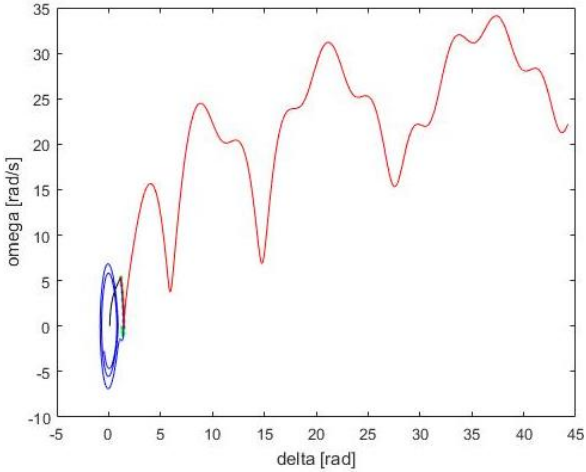
simulasi gangguan 3 fasa yang diletakkan pada saluran antara bus 1 dan bus 4. Hasil simulasi menggunakan metode *critical trajectory* bernilai 0.3550, sedangkan metode konvensional didapat hasil dengan rentang nilai 0.35-0.36. Gambar 4.7-4.9 ini merupakan grafik hasil yang didapatkan pada generator 1, generator 2, dan generator 3.



Gambar 4.7 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A



Gambar 4.8 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A

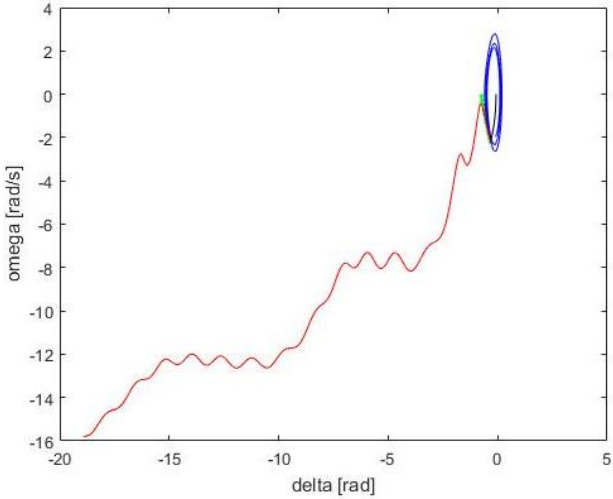


Gambar 4.9 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 3 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A

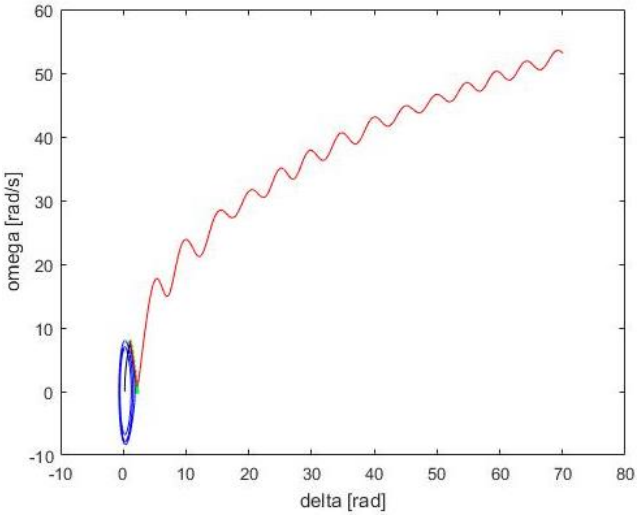
Apabila melihat gambar 4.7-4.9, terlihat kurva biru menunjukkan rotor berosilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) dan dilakukan pemutusan setelah 0.35 detik. Sedangkan kurva merah menunjukkan jika sistem apabila terjadi gangguan dan diputus setelah 0.36 detik, rotor berisolasi dengan naiknya percepatan seiring bertambahnya pergeseran sudut rotor dan menyebabkan generator menjadi lepas sinkron. Kurva hijau yang merupakan hasil dari metode *critical trajectory* berada diantara kondisi stabil dan tidak stabil, maka dari itu hasil simulasi sesuai dengan metode konvensional.

4.1.2.2. Analisis Grafik Hasil Simulasi Metode Critical Trajectory pada Titik Gangguan B

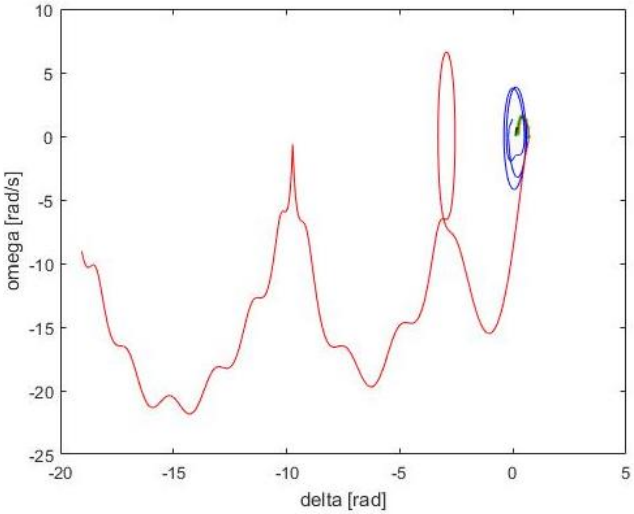
Seperti 4.1.1.1, di bawah ini ditampilkan grafik pada titik B untuk mewakili salah satu dari keseluruhan simulasi pada titik gangguan. Titik gangguan B pada sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus merupakan simulasi gangguan 3 fasa yang diletakkan pada saluran antara bus 2 dan bus 7. Hasil simulasi menggunakan metode *critical trajectory* bernilai 0.2190, sedangkan metode konvensional didapat hasil dengan rentang nilai 0.21-0.22. Gambar 4.10-4.12 ini merupakan grafik hasil yang didapatkan pada generator 1, generator 2, dan generator 3.



Gambar 4.10 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B



Gambar 4.11 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B



Gambar 4.12 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B

Apabila melihat gambar 4.10-4.12, terlihat kurva biru menunjukkan rotor berosilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) dan dilakukan pemutusan setelah 0.21 detik. Sedangkan kurva merah menunjukkan jika sistem apabila terjadi gangguan dan diputus setelah 0.22 detik, rotor berisolasi dengan naiknya percepatan seiring bertambahnya pergeseran sudut rotor dan menyebabkan generator menjadi lepas sinkron. Kurva hijau yang merupakan hasil dari metode *critical trajectory* berada diantara kondisi stabil dan tidak stabil, maka dari itu hasil simulasi sesuai dengan metode konvensional.

4.1.3. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 5% Sebelum Penambahan SCES

Pada tabel 4.3 dibawah ini menunjukkan perbandingan hasil *Critical Clearing Time* yang didapatkan melalui dua metode berbeda, yaitu konvensiunal TDS dan *Critical Trajectory*. Seperti yang sudah disampaikan sebelumnya, metode TDS adalah perhitungan dengan hasil berupa rentang waktu pemutusan stabil dan waktu pemutusan tak stabil, sedangkan *critical trajectory* merupakan perhitungan dengan hasil yang langsung. Perbedaan dari 4.1.1 hanya perbedaan sistemnya karena

ditambahkan penambahan koefisien *damping* sebesar 5%. *Damping* pada sistem sendiri digunakan untuk meredam isolasi akibat gangguan dan *damping* sendiri sudah terpasang secara tetap pada rotor maupun stator di dalam generator.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan CCT pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan Damping 5% Sebelum Penambahan SCES

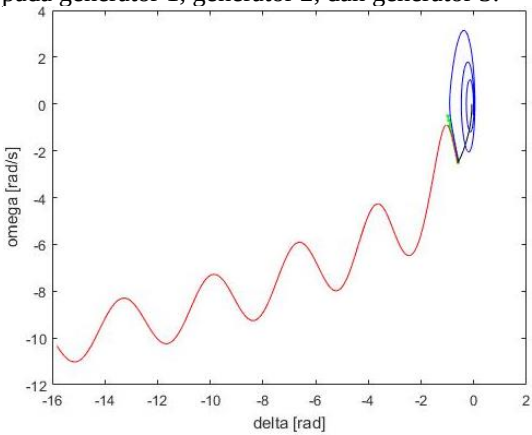
Fault	damping	TDS	critical trajectory	error
A	5%	0.40-0.41	0.4069	0
B	5%	0.24-0.25	0.2438	0
C	5%	0.33-0.34	0.3324	0
D	5%	0.38-0.39	0.3857	0
E	5%	0.38-0.39	0.3835	0
F	5%	0.25-0.26	0.2501	0
G	5%	0.26-0.27	0.2638	0
H	5%	0.32-0.33	0.3297	0
I	5%	0.32-0.33	0.3302	0

Hasil perhitungan metode konvensional TDS sendiri akan menjadi acuan hasil dari metode *critical trajectory*. Pada tabel 4.3 diambil contoh titik gangguan A yang memiliki hasil perhitungan metode *critical trajectory* sebesar 0.4069 dan jika dibandingkan dengan hasil perhitungan metode konvensional TDS pada titik gangguan A, terlihat bahwa hasil yang diperoleh berada di antara rentang hasil metode konvensional. Karena pada hasil metode konvensional apabila CCT berada di nilai 0.40 berarti sistem tersebut stabil dan jika nilai CCT 0.41 sistem tidak stabil. Pada tabel 4.3 juga telihat tidak adanya error pada hasil CCT menggunakan *critical trajectory* dengan metode konvensional.

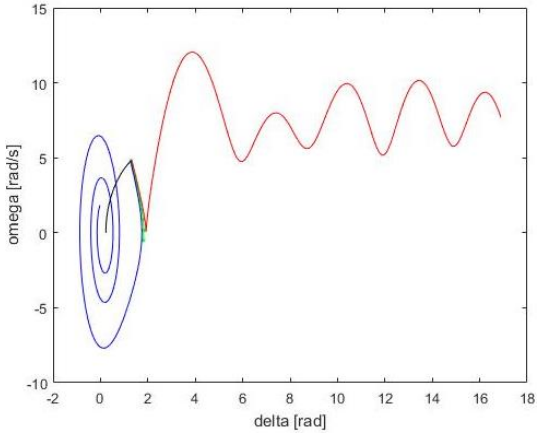
4.1.3.1. Analisis Grafik Hasil Simulasi Metode Critical Trajectory pada Titik Gangguan A

Seperti 4.1.1.1, di bawah ini ditampilkan grafik pada titik A untuk mewakili salah satu dari keseluruhan simulasi pada titik gangguan. Titik

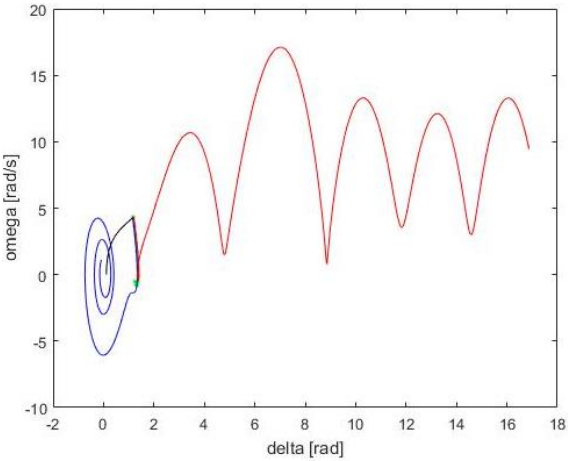
gangguan A pada sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus merupakan simulasi gangguan 3 fasa yang diletakkan pada saluran antara bus 1 dan bus 4. Hasil simulasi menggunakan metode *critical trajectory* bernilai 0.4069, sedangkan metode konvensional didapat hasil dengan rentang nilai 0.40-0.41. Gambar 4.13-4.15 ini merupakan grafik hasil yang didapatkan pada generator 1, generator 2, dan generator 3.



Gambar 4.13 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A



Gambar 4.14 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A



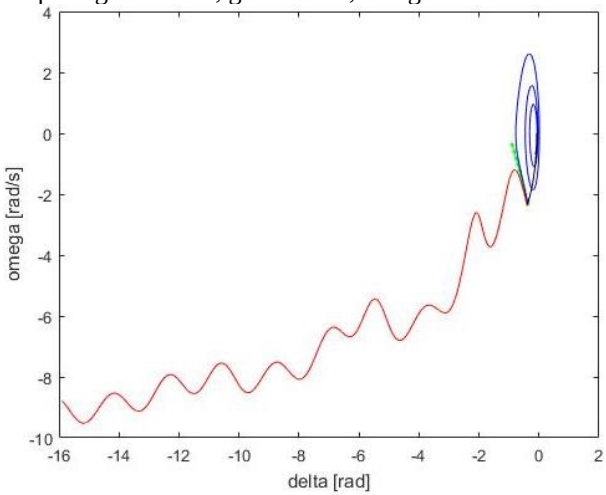
Gambar 4.15 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik A

Apabila melihat gambar 4.12-4.15, terlihat kurva biru menunjukkan rotor berosilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) dan dilakukan pemutusan setelah 0.40 detik. Sedangkan kurva merah menunjukkan jika sistem apabila terjadi gangguan dan diputus setelah 0.41 detik, rotor berisolasi dengan naiknya percepatan seiring bertambahnya pergeseran sudut rotor dan menyebabkan generator menjadi lepas sinkron. Kurva hijau yang merupakan hasil dari metode *critical trajectory* berada diantara kondisi stabil dan tidak stabil, maka dari itu hasil simulasi sesuai dengan metode konvensional.

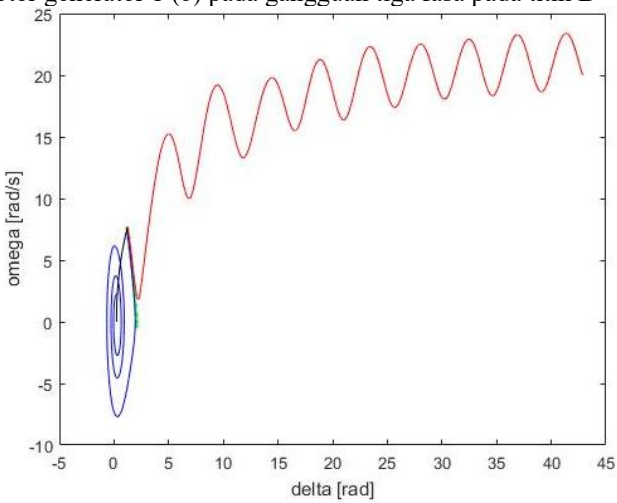
4.1.3.2. Analisis Grafik Hasil Simulasi Metode Critical Trajectory pada Titik Gangguan B

Seperti 4.1.1.1, di bawah ini ditampilkan grafik pada titik A untuk mewakili salah satu dari keseluruhan simulasi pada titik gangguan. Titik gangguan B pada sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus merupakan simulasi gangguan 3 fasa yang diletakkan pada saluran antara bus 2 dan bus 7. Hasil simulasi menggunakan metode *critical trajectory* bernilai 0.2438, sedangkan metode konvensional didapat hasil dengan rentang

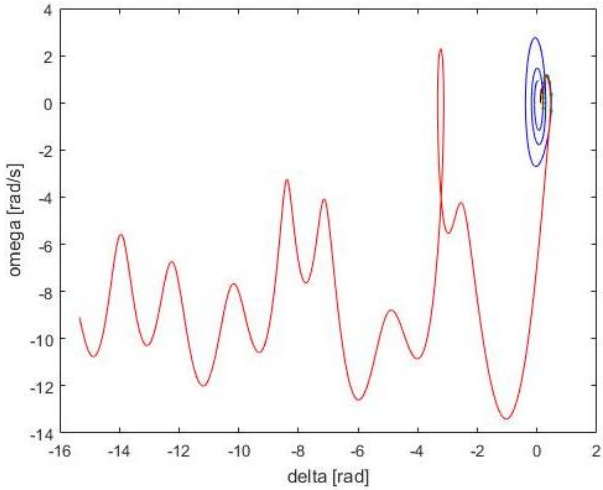
nilai 0.24-0.25. Gambar 4.16-4.18 ini merupakan grafik hasil yang didapatkan pada generator 1, generator 2, dan generator 3.



Gambar 4.16 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 1 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B



Gambar 4.17 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 2 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B



Gambar 4.18 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor generator 3 (δ) pada gangguan tiga fasa pada titik B

Apabila melihat gambar 4.16-4.18, terlihat kurva biru menunjukkan rotor berosilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) dan dilakukan pemutusan setelah 0.24 detik. Sedangkan kurva merah menunjukkan jika sistem apabila terjadi gangguan dan diputus setelah 0.25 detik, rotor berisolasi dengan naiknya percepatan seiring bertambahnya pergeseran sudut rotor dan menyebabkan generator menjadi lepas sinkron. Kurva hijau yang merupakan hasil dari metode *critical trajectory* berada diantara kondisi stabil dan tidak stabil, maka dari itu hasil simulasi sesuai dengan metode konvensional.

4.2. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* Setelah Penambahan SCES

Seperti pada 4.1, pada simulasi ini juga dilakukan pada sistem 3 Gen-9 Bus dengan tiga kondisi *Damping* yaitu, 0%, 1%, dan 5%. Namun pada simulasi ini dipasang SCES pada bus generator 2 yang diatur keluarannya dengan kontroler. Kontroler akan mengatur waktu kerja SCES dalam kegunaannya dalam menambah hasil CCT yang didapat dalam perhitungan. Daya keluaran SCES juga bergantung pada waktu kerjanya. SCES yang digunakan sebesar 1 p.u dengan waktu kerja asli 0.001 detik dan pada penelitian ini dipilih waktu kerja setara dengan

keluaran SCES sebesar 0.1 p.u, 0.2 p.u, dan 0.3 p.u. Perhitungan untuk mencari nilai CCT juga sama seperti 4.1 dengan menggunakan dua metode.

4.2.1. Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 0% Setelah Penambahan SCES

Pada simulasi ini sebenarnya tidak jauh berbeda dari simulasi sebelumnya dan dilakukan pasa sistem 3 Gen-9 Bus yang memiliki *damping* 0% atau bisa dikatakan tanpa *damping*. Perbedaan yang mendasar hanya dari pemasangan SCES pada bus generator 2 dan diatur waktu kerjanya oleh kontroler. Simulasi ini menggunakan tiga kondisi waktu kerja SCES yang apabila disimbolkan dalam tc, ketiga kondisi tersebut yaitu 0.010 detik, 0.005 detik, dan 0.003 detik. Tiga kondisi tersebut juga memiliki nilai keluaran SCES yang berbeda-beda, untuk lebih jelasnya akan ditampilkan hasil perhitungan SCES sesuai pada tabel di bawah ini yang terdiri dari perhitungan pada setiap titik gangguan dari titik gangguan A sampai titik gangguan I.

4.2.1.1. Titik Gangguan A

Titik gangguan A merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 1 dan bus 4 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan A

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.36-0.37	0.3670	0
0.005	0.2	0.39-0.40	0.3943	0
0.003	0.3	0.43-0.44	0.4371	0

Terlihat pada tabel nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu

kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya sama dengan 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.4.

Jika melihat tabel, bisa dikatakan bahwa seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk diaktifkan dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang di dapat menjadi lebih besar seiring dengan bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.1.2. Titik Gangguan B

Titik gangguan B merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 2 dan bus 7 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan B

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.22-0.23	0.2289	0
0.005	0.2	0.24-0.25	0.2460	0
0.003	0.3	0.26-0.27	0.2711	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.5.

Pada tabel 4.5, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.1.3. Titik Gangguan C

Titik gangguan C merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 3 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan C

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.25-0.26	0.2511	0
0.005	0.2	0.25-0.26	0.2534	0
0.003	0.3	0.25-0.26	0.2506	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.6.

Pada tabel 4.6, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

Namun kenaikan CCT tidak terjadi saat diaktifkan pada 0.003 detik, nilainya CCT menjadi turun tetapi tidak terjadi *error*, ini dikarenakan tidak semua titik gangguan apabila diberikan nilai SCES yang meningkat nilai CCTnya pun ikut meningkat. .

4.2.1.4. Titik Gangguan D

Titik gangguan D merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 4 dan bus 5 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil

perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan D

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.34-0.35	0.3471	0
0.005	0.2	0.37-0.38	0.3702	0
0.003	0.3	0.40-0.41	0.4054	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.7.

Pada tabel 4.7, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.1.5 Titik Gangguan E

Titik gangguan E merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 4 dan bus 6 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Terlihat pada tabel4.8, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan E

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.34 0.35	0.3471	0
0.005	0.2	0.37-0.38	0.3694	0
0.003	0.3	0.40-0.41	0.4048	0

Pada tabel 4.8, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.1.6 Titik Gangguan F

Titik gangguan F merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 7 dan bus 5 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan F

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.23-0.24	0.2345	0
0.005	0.2	0.25-0.26	0.2516	0
0.003	0.3	0.27-0.28	0.2777	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja

dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.9.

Pada tabel 4.9, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.1.7 Titik Gangguan G

Titik gangguan G merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 7 dan bus 8 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan G

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.24-0.25	0.2477	0
0.005	0.2	0.26-0.27	0.2644	0
0.003	0.3	0.28-0.29	0.2890	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.10.

Pada tabel 4.10, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.1.8 Titik Gangguan H

Titik gangguan H merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 6 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.11 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan H

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.26-0.27	0.2625	0
0.005	0.2	0.26-0.27	0.2721	0.77
0.003	0.3	0.26-0.27	0.2629	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.11.

Pada tabel 4.13, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error dan hanya pada waktu kerja 0.005 detik memiliki *error*, namun karena *error* kurang dari 5%, maka masih diperbolehkan. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

Namun kenaikan CCT tidak terjadi saat diaktifkan pada 0.003 detik, nilainya CCT menjadi turun tetapi tidak terjadi *error*, ini dikarenakan tidak semua titik gangguan apabila diberikan nilai SCES yang meningkat nilai CCTnya pun ikut meningkat.

4.2.1.9 Titik Gangguan I

Titik gangguan I merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 8 dan bus 9 dalam sistem Fouad-

Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan I

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.25-0.26	0.2594	0
0.005	0.2	0.25-0.26	0.2556	0
0.003	0.3	0.26-0.27	0.2616	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.12.

Pada tabel 4.12, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

Namun kenaikan CCT tidak terjadi saat diaktifkan pada 0.005 detik, nilainya CCT menjadi turun tetapi tidak terjadi *error*, ini dikarenakan tidak semua titik gangguan apabila diberikan nilai SCES yang meningkat nilai CCTnya pun ikut meningkat.

4.2.2 Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 1% Setelah Penambahan SCES

Pada simulasi ini sebenarnya tidak jauh berbeda dari simulasi sebelumnya dan dilakukan pasa sistem 3 Gen-9 Bus yang memiliki *damping* 1%. Perbedaan yang mendasar hanya dari pemasangan SCES pada bus generator 2 dan diatur waktu kerjanya oleh kontroler. Simulasi ini menggunakan tiga kondisi waktu kerja SCES yang apabila disimbolkan dalam tc, ketiga kondisi tersebut yaitu 0.010 detik, 0.005

detik, dan 0.003 detik. Tiga kondisi tersebut juga memiliki nilai keluaran SCES yang berbeda-beda, untuk lebih jelasnya akan ditampilkan hasil perhitungan SCES sesuai pada tabel di bawah ini yang terdiri dari perhitungan pada setiap titik gangguan dari titik gangguan A sampai titik gangguan I.

4.2.2.1 Titik Gangguan A

Titik gangguan A merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 1 dan bus 4 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan A

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.38-0.39	0.3813	0
0.005	0.2	0.41-0.42	0.4099	0.0002
0.003	0.3	0.45-0.46	0.4571	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.13.

Pada tabel 4.13, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error dan hanya pada waktu kerja 0.005 detik memiliki *error*, namun karena *error* kurang dari 5%, maka masih diperbolehkan. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.2.2 Titik Gangguan B

Titik gangguan B merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 2 dan bus 7 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan B

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.23-0.24	0.2352	0
0.005	0.2	0.25-0.26	0.2527	0
0.003	0.3	0.27-0.28	0.2786	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.14.

Pada tabel 4.14, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.2.3 Titik Gangguan C

Titik gangguan C merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 3 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan C

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.27-0.28	0.2706	0
0.005	0.2	0.26-0.27	0.2676	0
0.003	0.3	0.26-0.27	0.2642	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.6.

Pada tabel 4.6, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

Namun kenaikan CCT tidak terjadi saat diaktifkan pada 0.005 detik dan 0.003 detik, nilainya CCT menjadi turun tetapi tidak terjadi *error*, ini dikarenakan tidak semua titik gangguan apabila diberikan nilai SCES yang meningkat nilai CCTnya pun ikut meningkat.

4.2.2.4 Titik Gangguan D

Titik gangguan D merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 4 dan bus 5 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.16 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan D

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.36-0.37	0.3600	0
0.005	0.2	0.38-0.39	0.3843	0
0.003	0.3	0.42-0.43	0.4219	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.16.

Pada tabel 4.16, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.2.5 Titik Gangguan E

Titik gangguan E merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 4 dan bus 6 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan E

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.35-0.36	0.3584	0
0.005	0.2	0.38-0.39	0.3835	0
0.003	0.3	0.42-0.43	0.4209	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.17.

Pada tabel 4.17, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.2.6 Titik Gangguan F

Titik gangguan F merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 7 dan bus 5 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.18 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan F

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.24-0.25	0.2407	0
0.005	0.2	0.26-0.27	0.2625	0
0.003	0.3	0.28-0.29	0.2887	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.18.

Pada tabel 4.18, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada

error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.2.7 Titik Gangguan G

Titik gangguan G merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 7 dan bus 8 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan G

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.25-0.26	0.2545	0
0.005	0.2	0.27-0.28	0.2714	0
0.003	0.3	0.29-0.30	0.2983	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.19.

Pada tabel 4.19, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.2.8 Titik Gangguan H

Titik gangguan H merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 6 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil

perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan H

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.27-0.28	0.2763	0
0.005	0.2	0.27-0.28	0.2850	0.017
0.003	0.3	0.27-0.28	0.2703	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.20.

Pada tabel 4.20, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error dan hanya pada waktu kerja 0.005 detik memiliki *error*, namun karena *error* kurang dari 5%, maka masih diperbolehkan. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.2.9 Titik Gangguan I

Titik gangguan I merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 8 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.21 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan I

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.27-0.28	0.2765	0
0.005	0.2	0.27-0.28	0.2780	0
0.003	0.3	0.27-0.28	0.2742	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.21.

Pada tabel 4.21, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

Namun kenaikan CCT tidak terjadi saat diaktifkan pada 0.003 detik, nilainya CCT menjadi turun tetapi tidak terjadi *error*, ini dikarenakan tidak semua titik gangguan apabila diberikan nilai SCES yang meningkat nilai CCTnya pun ikut meningkat.

4.2.3 Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan *Damping* 5% Setelah Penambahan SCES

Pada simulasi ini sebenarnya tidak jauh berbeda dari simulasi sebelumnya dan dilakukan pasa sistem 3 Gen-9 Bus yang memiliki *damping* 5%. Perbedaan yang mendasar hanya dari pemasangan SCES pada bus generator 2 dan diatur waktu kerjanya oleh kontroler. Simulasi ini menggunakan tiga kondisi waktu kerja SCES yang apabila disimbolkan dalam tc, ketiga kondisi tersebut yaitu 0.010 detik, 0.005 detik, dan 0.003 detik. Tiga kondisi tersebut juga memiliki nilai keluaran SCES yang berbeda-beda, untuk lebih jelasnya akan ditampilkan hasil perhitungan SCES sesuai pada tabel di bawah ini yang terdiri dari

perhitungan pada setiap titik gangguan dari titik gangguan A sampai titik gangguan I.

4.2.3.1 Titik Gangguan A

Titik gangguan A merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 1 dan bus 4 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.22 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan A

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.43-0.44	0.4382	0
0.005	0.2	0.47-0.48	0.4730	0
0.003	0.3	0.53-0.54	0.5303	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.22.

Pada tabel 4.22, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error dan hanya pada waktu kerja 0.005 detik memiliki *error*, namun karena *error* kurang dari 5%, maka masih diperbolehkan. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.3.2 Titik Gangguan B

Titik gangguan B merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 2 dan bus 7 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil

perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.23 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan B

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.26-0.27	0.2616	0
0.005	0.2	0.28-0.29	0.2807	0
0.003	0.3	0.30-0.31	0.3091	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.23.

Pada tabel 4.23, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error dan hanya pada waktu kerja 0.005 detik memiliki *error*, namun karena *error* kurang dari 5%, maka masih diperbolehkan. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.3.3 Titik Gangguan C

Titik gangguan C merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 3 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.24 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan C

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.32-0.33	0.3279	0
0.005	0.2	0.32-0.33	0.3257	0
0.003	0.3	0.35-0.36	0.3214	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.24.

Pada tabel 4.24, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

Namun kenaikan CCT tidak terjadi saat diaktifkan pada 0.003 detik, nilainya CCT menjadi turun tetapi tidak terjadi *error*, ini dikarenakan tidak semua titik gangguan apabila diberikan nilai SCES yang meningkat nilai CCTnya pun ikut meningkat.

4.2.3.4 Titik Gangguan D

Titik gangguan D merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 4 dan bus 5 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.25.

Tabel 4.25 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan D

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS		critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.41	0.42	0.4115	0
0.005	0.2	0.44	0.45	0.4422	0
0.003	0.3	0.48	0.49	0.4892	0

Pada tabel 4.25, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.3.5 Titik Gangguan E

Titik gangguan E merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 4 dan bus 6 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.26 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan E

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.41-0.42	0.4100	0
0.005	0.2	0.44-0.45	0.4415	0
0.003	0.3	0.48-0.49	0.4876	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja

dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.26.

Pada tabel 4.26, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.3.6 Titik Gangguan F

Titik gangguan F merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 7 dan bus 5 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.27 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan F

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.27-0.28	0.2709	0
0.005	0.2	0.29-0.30	0.2918	0
0.003	0.3	0.32-0.33	0.3241	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.27.

Pada tabel 4.27, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.3.7 Titik Gangguan G

Titik gangguan G merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 7 dan bus 8 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.28 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan G

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.28-0.29	0.2811	0
0.005	0.2	0.30-0.31	0.2995	0.0017
0.003	0.3	0.32-0.33	0.3272	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.28.

Pada tabel 4.28, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error dan hanya pada waktu kerja 0.005 detik memiliki *error*, namun karena *error* kurang dari 5%, maka masih diperbolehkan. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

4.2.3.8 Titik Gangguan H

Titik gangguan H merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 6 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.29.

Tabel 4.29 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan H

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.33-0.34	0.3359	0
0.005	0.2	0.33-0.34	0.3377	0
0.003	0.3	0.33-0.34	0.3320	0

Pada tabel 4.29, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error. Dan apabila SCES diatur untuk aktif dengan waktu mendekati 0.001 detik atau setara dengan naiknya daya keluaran SCES, nilai CCT yang didapat lebih besar seiring bertambahnya keluaran daya SCES.

Namun kenaikan CCT tidak terjadi saat diaktifkan pada 0.003 detik, nilainya CCT menjadi turun tetapi tidak terjadi *error*, ini dikarenakan tidak semua titik gangguan apabila diberikan nilai SCES yang meningkat nilai CCTnya pun ikut meningkat.

4.2.3.9 Titik Gangguan I

Titik gangguan I merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 8 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.30 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan I

Waktu Kerja SCES/ tc(s)	Nilai SCES (pu)	TDS	critical trajectory	error (%)
0.010	0.1	0.33-0.34	0.3334	0
0.005	0.2	0.33-0.34	0.3224	0.0230
0.003	0.3	0.33-0.34	0.3315	0

Terlihat pada tabel, nilai keluaran SCES akan tergantung sesuai waktu kerja SCES tersebut. SCES yang dipasang sebesar 1 p.u dengan waktu kerja awal 0.001, namun daya keluarannya tergantung pada waktu kerja SCES itu sendiri yang diatur melalui kontroler, apabila bekerja dalam waktu 0.01 detik maka keluarannya setara 0.1 p.u. begitu juga untuk waktu kerja yang lain, tertera pada tabel 4.30.

Pada tabel 4.30, terlihat seluruh hasil perhitungan metode *critical trajectory* berada diantara hasil metode konvensional TDS atau tidak ada error dan hanya pada waktu kerja 0.005 detik memiliki *error*, namun karena *error* kurang dari 5%, maka masih diperbolehkan.

Namun kenaikan CCT tidak terjadi saat diaktifkan pada 0.002 detik dan 0.003 detik, nilainya CCT menjadi turun tetapi tidak terjadi *error*, ini dikarenakan tidak semua titik gangguan apabila diberikan nilai SCES yang meningkat nilai CCTnya pun ikut meningkat.

4.3 Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* pada Sistem 3 Gen-9 Bus dengan Perubahan Nilai *Damping*

Simulasi ini dilakukan hanya sebagai penambahan informasi mengenai efek *damping* yang ada pada suatu sistem khususnya sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus. Berikut ini akan ditampilkan perhitungan nilai *critical clearing time* menggunakan dua metode, yaitu konvensional TDS dan *critical trajectory* tanpa menggunakan *Supercapacitor Energy Storage* pada setiap titik gangguan pada sistem. Karena pada 4.1.1 telah ditunjukkan simulasi apabila perhitungan nilai *critical clearing time* pada sistem tanpa menggunakan *damping* atau *damping* 0%, maka dibawah ini akan ditunjukkan simulasi dengan sistem yang memiliki *damping* 1% sampai dengan 5%.

4.3.1 Titik gangguan A

Titik gangguan A merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 1 dan bus 4 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.31 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan A

damping	**CCT**	
	TDS	critical trajectory
0	0.34-0.35	0.3425
0.01	0.35-0.36	0.3550
0.02	0.36-0.37	0.3678
0.03	0.38-0.39	0.3809
0.04	0.39-0.40	0.3939
0.05	0.40-0.41	0.4069

Terlihat pada tabel di atas, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*.

4.3.2 Titik gangguan B

Titik gangguan B merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 2 dan bus 7 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Terlihat pada tabel di bawah ini, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*.

Tabel 4.32 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan B

damping	CCT	
	TDS	critical trajectory
0	0.21-0.22	0.2131
0.01	0.21-0.22	0.2191
0.02	0.22-0.23	0.2252
0.03	0.23-0.24	0.2314
0.04	0.23-0.24	0.2376
0.05	0.24-0.25	0.2438

4.3.3 Titik gangguan C

Titik gangguan C merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 3 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.33 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan C

damping	CCT	
	TDS	critical trajectory
0	0.24-0.25	0.2463
0.01	0.27-0.28	0.2728
0.02	0.28-0.29	0.2867
0.03	0.30-0.31	0.3013
0.04	0.31-0.32	0.3165
0.05	0.33-0.34	0.3324

Terlihat pada tabel di atas, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*.

4.3.4 Titik gangguan D

Titik gangguan D merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 4 dan bus 5 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.34 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan D

damping	**CCT**	
	TDS	critical trajectory
0	0.32-0.33	0.3261
0.01	0.33-0.34	0.3377
0.02	0.34-0.35	0.3493
0.03	0.36-0.37	0.3611
0.04	0.37-0.38	0.3735
0.05	0.38-0.39	0.3857

Terlihat pada tabel di atas, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*.

4.3.5 Titik gangguan E

Titik gangguan E merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 4 dan bus 6 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Terlihat pada tabel di bawah ini, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*.

Tabel 4.35 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan E

damping	CCT	
	TDS	critical trajectory
0	0.32-0.33	0.3256
0.01	0.33-0.34	0.3370
0.02	0.34-0.35	0.3485
0.03	0.36-0.37	0.3605
0.04	0.37-0.38	0.3721
0.05	0.38-0.39	0.3835

4.3.6 Titik gangguan F

Titik gangguan F merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 7 dan bus 5 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.36 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan F

damping	CCT	
	TDS	critical trajectory
0	0.22-0.23	0.2274
0.01	0.23-0.24	0.2327
0.02	0.23-0.24	0.2372
0.03	0.24-0.25	0.2420
0.04	0.25-0.26	0.2474
0.05	0.25-0.26	0.2501

Terlihat pada tabel di atas, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*.

4.3.7 Titik gangguan G

Titik gangguan G merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 7 dan bus 8 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.37 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan G

damping	**CCT**	
	TDS	critical trajectory
0	0.23-0.24	0.2321
0.01	0.23-0.24	0.2384
0.02	0.24-0.25	0.2450
0.03	0.25-0.26	0.2511
0.04	0.25-0.26	0.2575
0.05	0.26-0.27	0.2638

Terlihat pada tabel di atas, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*.

4.3.8 Titik gangguan H

Titik gangguan H merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 6 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Tabel 4.38 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan H

damping	**CCT**	
	TDS	critical trajectory
0	0.25-0.26	0.2579
0.01	0.26-0.27	0.2717
0.02	0.28-0.29	0.2855
0.03	0.29-0.30	0.2999
0.04	0.30-0.31	0.3145
0.05	0.32-0.33	0.3297

Terlihat pada tabel di atas, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*, namun pada sistem yang memiliki *damping* 1% dan 4% nilai CCT memiliki error namun kurang dari 5% sehingga hasil dari metode *critical trajectory* masih bisa digunakan.

4.3.9 Titik gangguan I

Titik gangguan I merupakan gangguan hubung singkat yang simulasikan pada saluran antara bus 8 dan bus 9 dalam sistem Fouad-Anderson 3 Gen-9 Bus. Tabel yang akan ditampilkan berupa hasil perhitungan dari metode konvensional TDS dan metode *critical trajectory*.

Terlihat pada tabel di bawah ini, hasil perhitungan nilai CCT pada titik gangguan tersebut meningkat seiring naiknya nilai *damping* pada suatu sistem. Hasil perhitungan nilai CCT menggunakan *critical trajectory* berada di antara rentang hasil pada perhitungan dengan metode konvensional dan tidak ada *error*, namun pada sistem yang memiliki *damping* 5% nilai CCT memiliki error namun kurang dari 5% sehingga hasil dari metode *critical trajectory* masih bisa digunakan.

Tabel 4.39 Hasil Perhitungan CCT pada Titik Gangguan I

damping	**CCT**	
	TDS	critical trajectory
0	0.26-0.27	0.2612
0.01	0.27-0.28	0.2856
0.02	0.28-0.29	0.2866
0.03	0.29-0.30	0.2972
0.04	0.31-0.32	0.3164
0.05	0.32-0.33	0.3302

BAB 5
PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi yang didapat beberapa analisis yang bisa diambil menjadi kesimpulan sebagai berikut:

1. Untuk sistem yang memiliki *damping* 0% atau tanpa *damping* sebelum penambahan SCES perhitungan CCT dengan metode *Critical Trajectory* dengan *end point* hilangnya sinkronisasi (*Losing Synchronism*) menunjukkan hasil yang akurat jika dilakukan komparasi dengan metode *Time Domain Simulation*. Hal ini dikarenakan pada hasil simulasi yang didapat tidak memiliki *error* pada sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus.
2. Untuk sistem yang memiliki *damping* 1% sampai 5% sebelum penambahan SCES perhitungan CCT dengan metode *Critical Trajectory* dengan *end point* hilangnya sinkronisasi (*Modified Losing Synchronism*) menunjukkan hasil yang cukup akurat pada beberapa titik gangguan jika dilakukan komparasi dengan metode *Time Domain Simulation*. Hal ini dikarenakan pada hasil simulasi yang didapat pada beberapa titik gangguan memiliki error. Namun karena kurang dari 5%, nilai perhitungan tetap bisa diterapkan pada sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus.
3. Pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* pada sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus dapat meningkatkan kestabilan sistem dengan meningkatkan nilai CCT. Nilai keluaran *Supercapacitor Energy Storage* yang semakin besar juga akan menambah besar nilai CCT yang didapat.
4. Koefisien *damping* terbukti dapat meredam isolasi apabila terjadi gangguan pada sistem kelistrikan, terlihat pada sub bab 4.3 apabila nilai *damping* semakin besar, nilai CCT yang didapat juga semakin besar. Sehingga apabila disandingkan bekerja bersama SCES akan menambah nilai CCT yang lebih besar daripada hanya menggunakan SCES saja

5.2. Saran

Pada ini terdapat beberapa saran yang dapat diberikan sebagai perbaikan dan pengembangan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Metode *critical trajectory* bisa diterapkan pada sistem kelistrikan asli untuk menguji kefektifan metode ini.
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaturan SCES sehingga kerja SCES lebih efektif.
3. Dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai *damper winding* pada generator agar sistem dapat menahan gangguan yang terjadi.
4. Dilakukan penelitian antara gabungan penggunaaan sistem yang memiliki *damper winding* dan *Supercapacitor Energy Storage* dilihat dari segi ekonomis

DAFTAR PUSTAKA

[1] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui and M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, August 2010.

[2] S. Wang, T. Wei and Z. Qi, "Supercapacitor Energy Storage Technology and its Application in Renewable Energy Power Generation System," *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*, 2008.

[3] P. Kundur, J. Paserba and V. Ajjarapu, "Definition and Classification of Power System Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, pp. 1387-1401, 2004.

[4] A. Riambodo, A. Priyadi and Soedibyo, "Penentuan Nilai Optimal Super Kapasitor Untuk Memperbaiki Kestabilan Transien Berbasis Metode Losing Synchronism," *Tugas Akhir Teknik Elektro ITS*, 2019.

[5] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, Power System Analysis, McGraw-Hill, 1994.

[6] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.

[7] S. Sharma, S. Pushpak and V. Chinde, "Sensitivity of Transient Stability Critical Clearing Time," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, 2018.

[8] A. A. Nurhasyimi, A. Priyadi and V. Lystianingrum, "Penentuan Letak Supercapacitor Energy Storage (SCES) Berdasarkan Metode Critical Trajectory untuk Memperbaiki Nilai Critical Clearing Time (CCT)," *Tugas Akhir Teknik Elektro ITS*, 2019.

[9] A. Priyadi, M. Hery, N. Yurino, M. Pujiantara and T. Puspita, "Losing Synchronism Technique based on Critical Trajectory Method for Obtaining The CCT with Installing SCES," in *ISITIA Conference*, 2018.

[10] K. Celic, M. Dadic and V. Vrzic, "Stator Damper Winding and Electromagnetic Parameters of Turbogenerators," *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2010.

[11] Sugiarto, S. P. Hadi, Tumiran and F. D. Wijaya, "Damper Winding Phenomena of Synchronous Generator Under Unbalanced Steady-State Condition: A Case of 500kV EHV Jamali System," *Seminar Nasional ke 8 : Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi*, 2013.

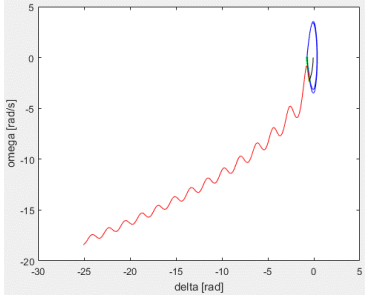
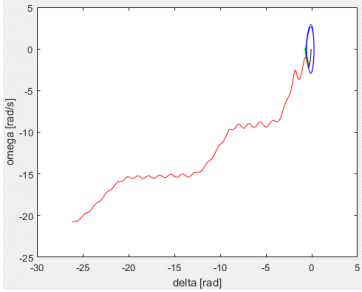
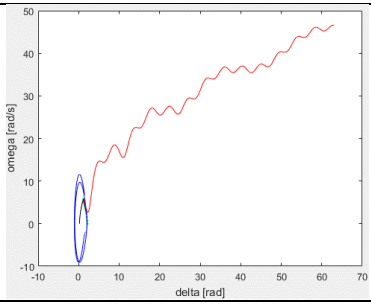
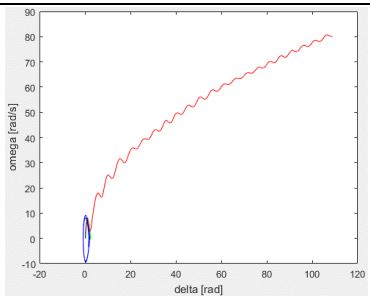
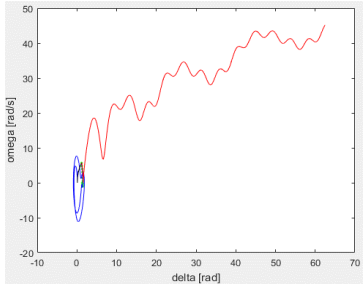
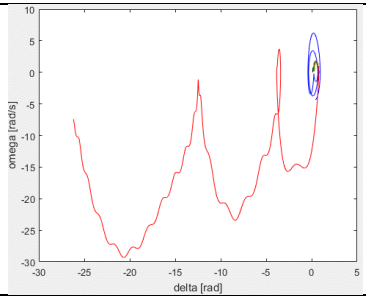
[12] H.-D. Chiang, C.-C. Chu and G. Cauley, "Direct Stability Analysis of Electric Power System Using Energy Function: Theory, Applications, and Perspective," *Proc. IEEE*, vol. 83, no. 11, pp. 1497-1529, 1995.

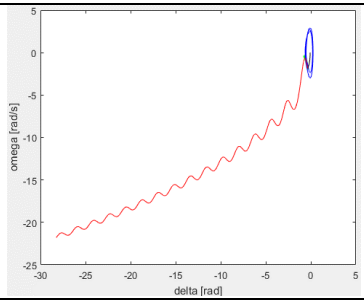
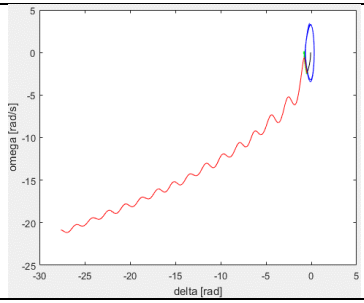
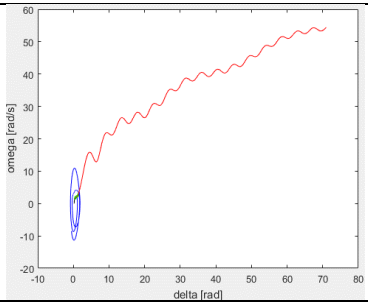
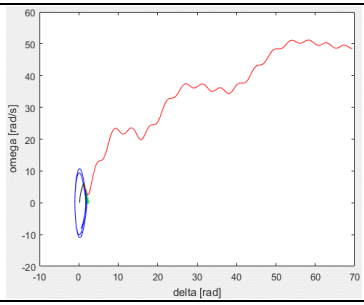
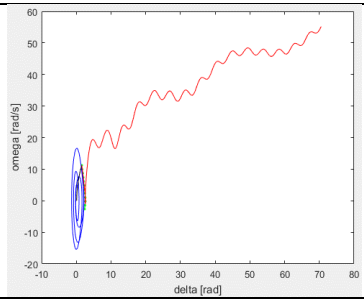
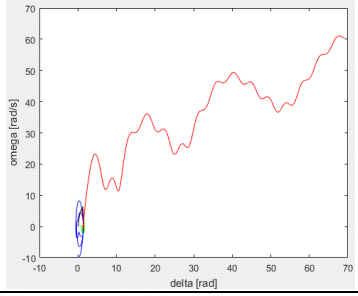
[13] M. Krpan and I. Kuzle, "Accurate Model of a Supercapacitor Bank for Power System Dynamics Studies".

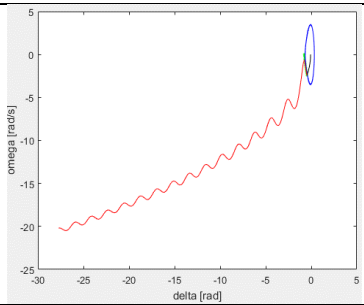
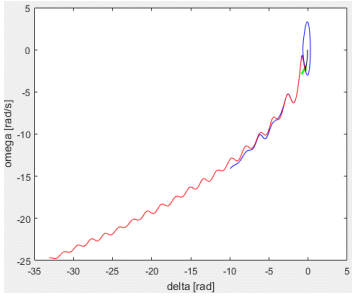
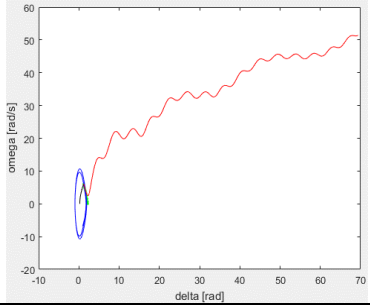
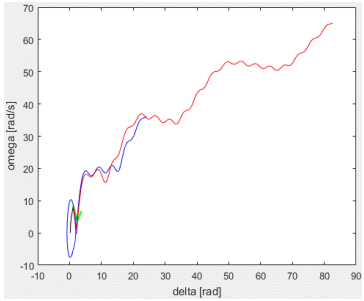
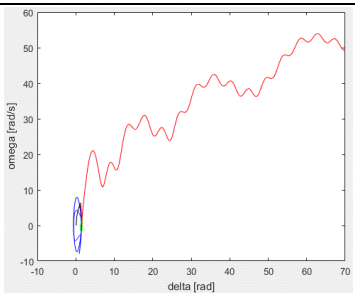
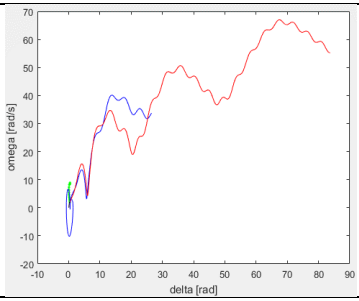
LAMPIRAN

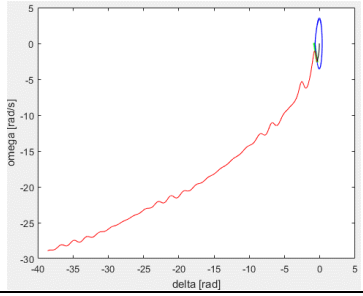
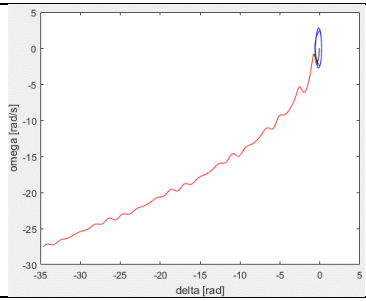
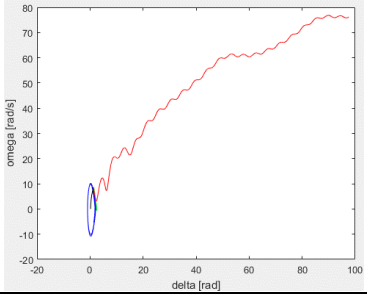
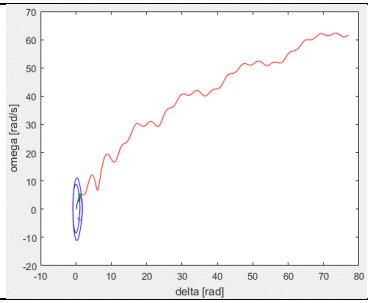
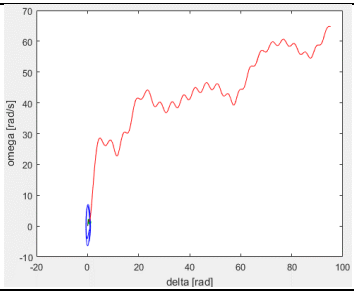
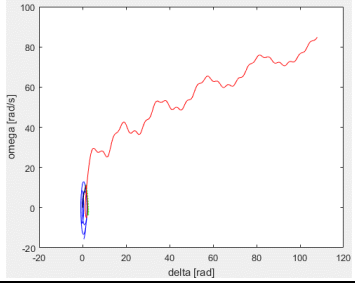
A. Grafik Omega terhadap Delta saat Sistem dengan *Damping* 0%

a. Grafik sistem tanpa SCES

Fault A	**Fault B**
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

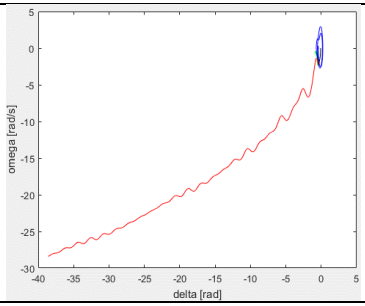
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

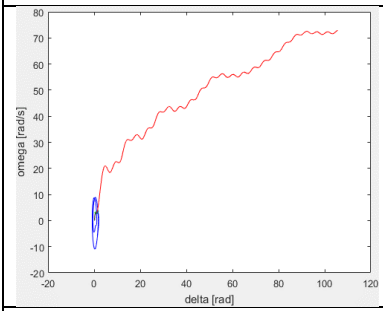
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

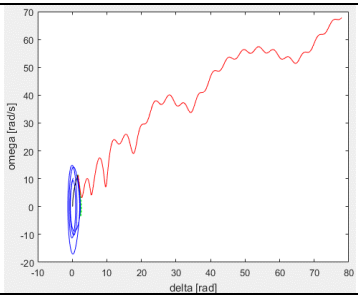
Generator 1



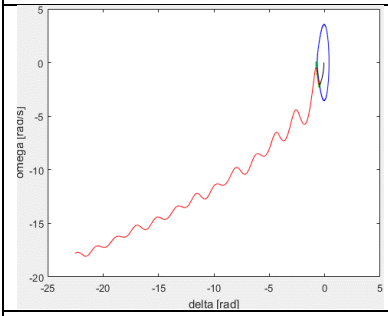
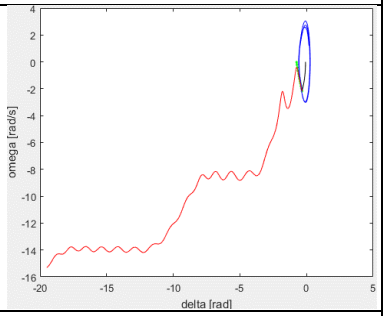
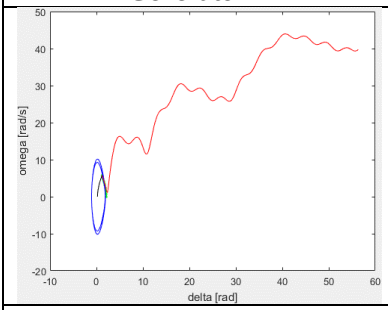
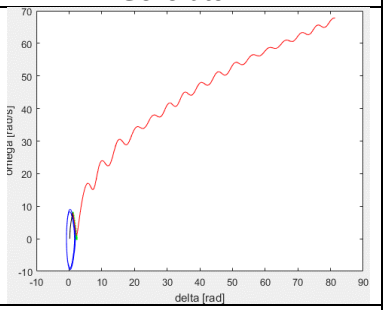
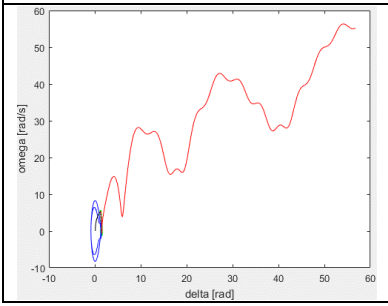
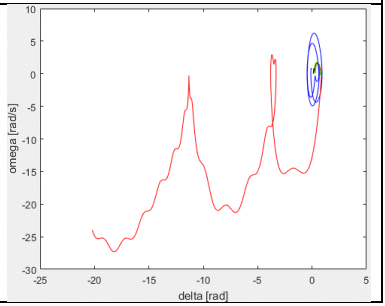
Generator 2

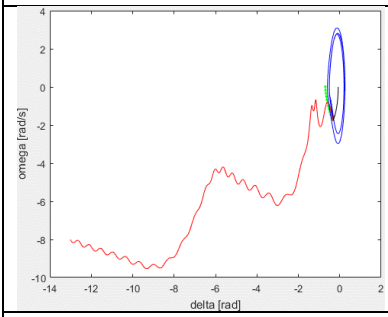
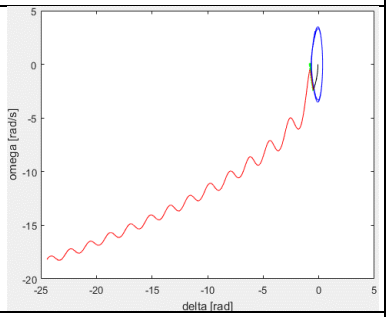
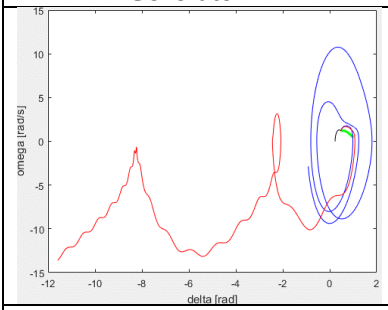
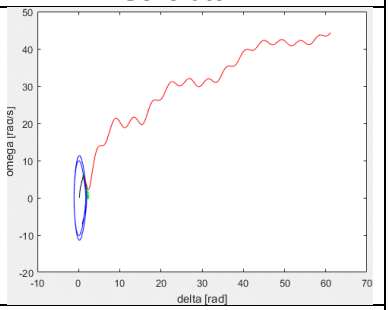
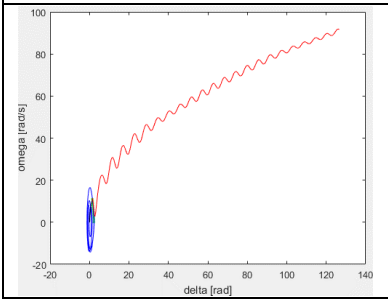
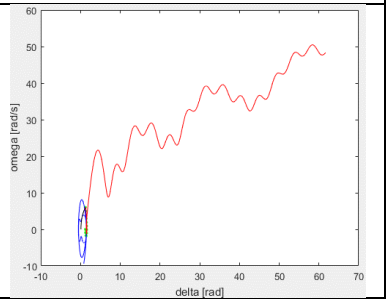


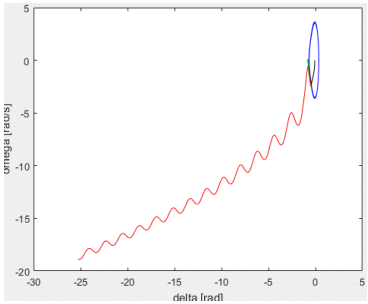
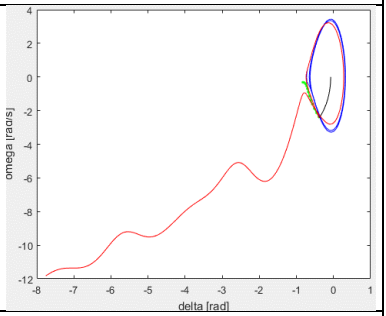
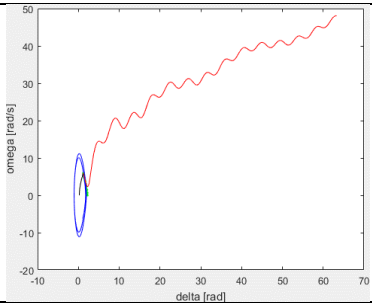
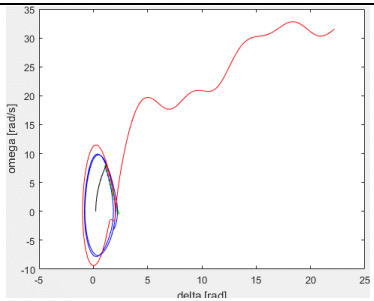
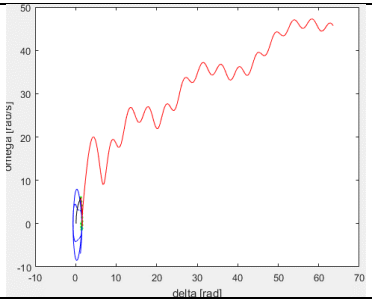
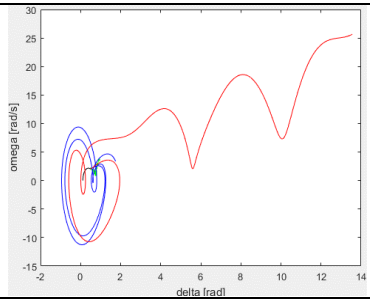
Generator 3

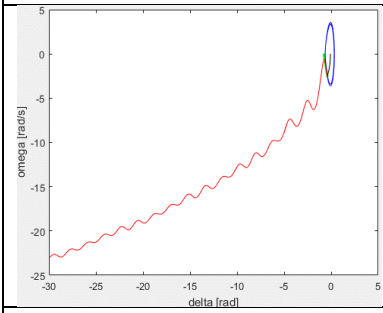
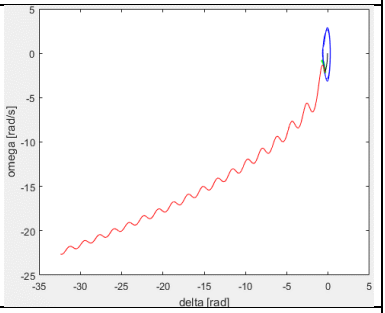
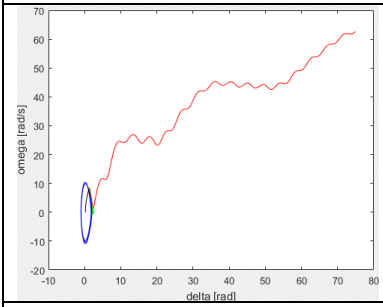
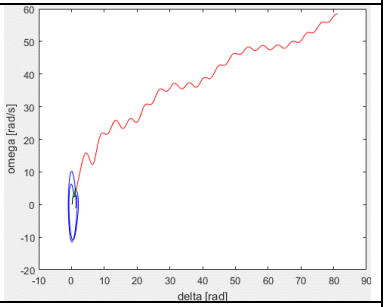
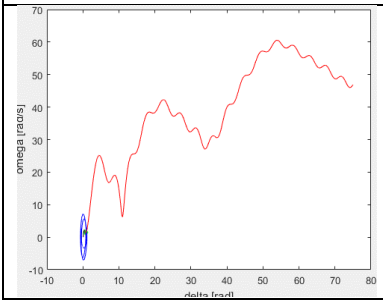
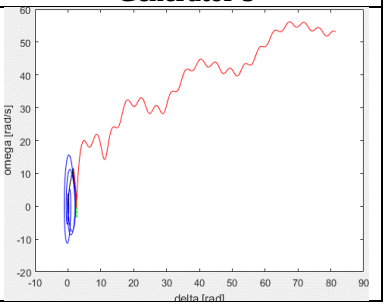


b. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.010 detik setara 0.1 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

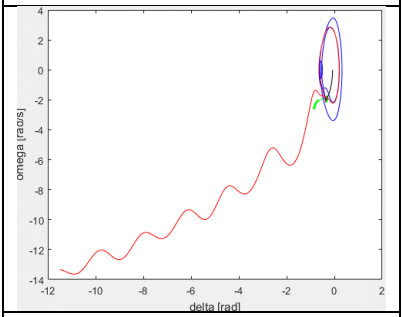
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

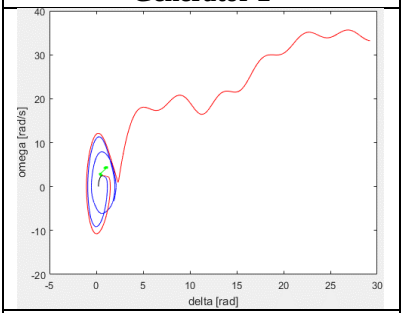
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

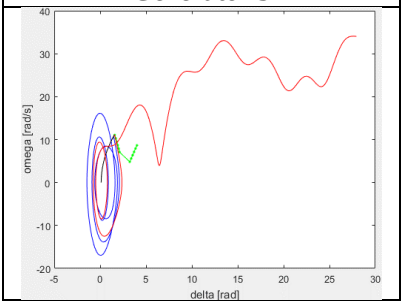
Generator 1



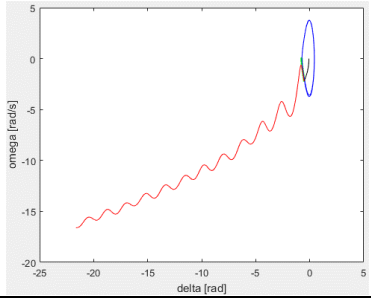
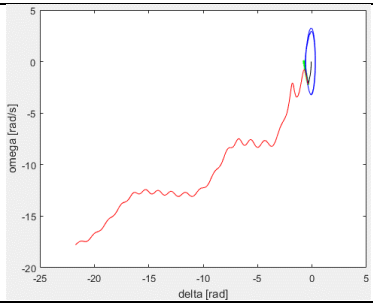
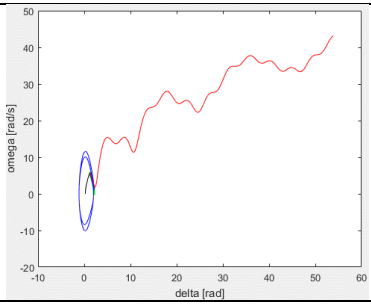
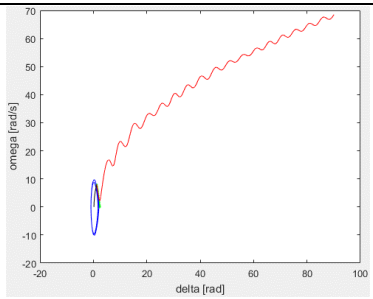
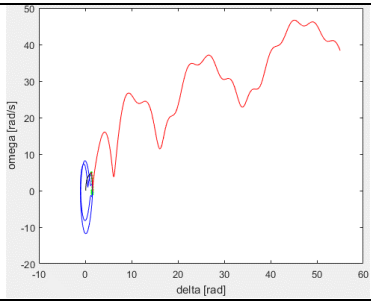
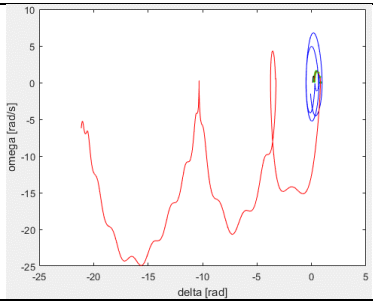
Generator 2

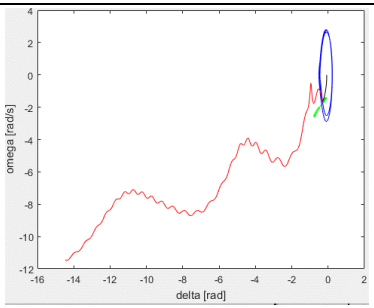
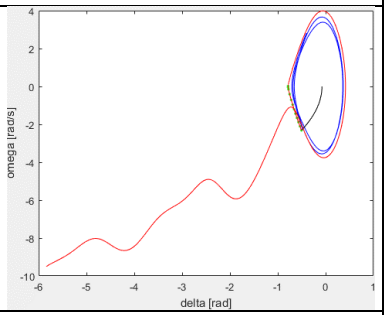
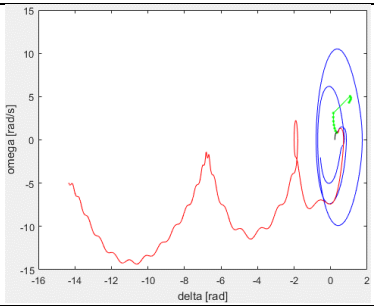
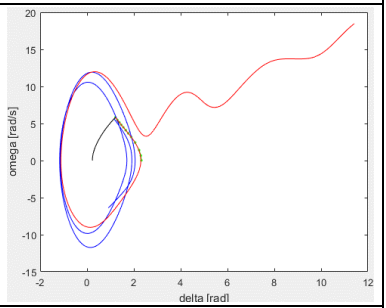
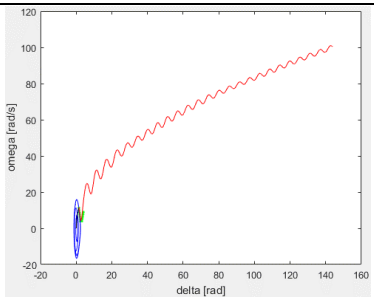
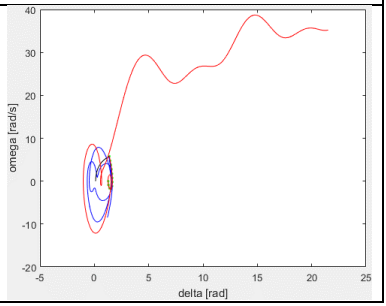


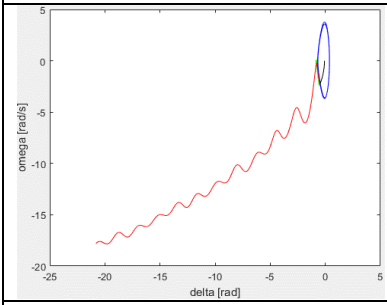
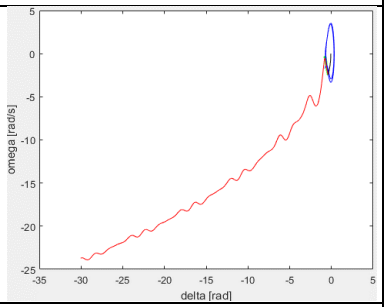
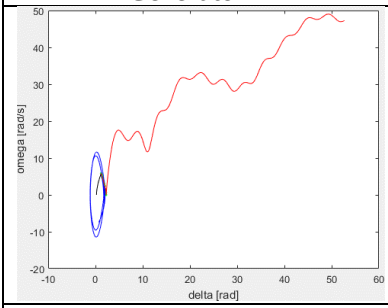
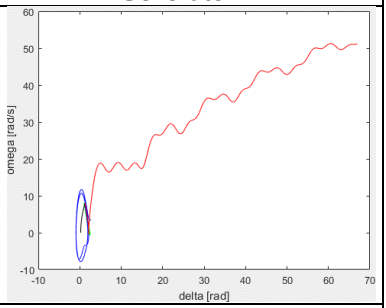
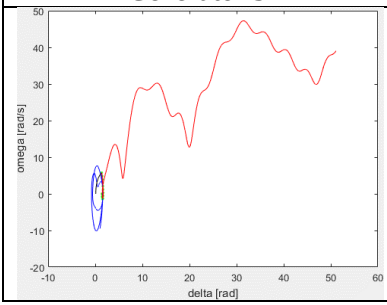
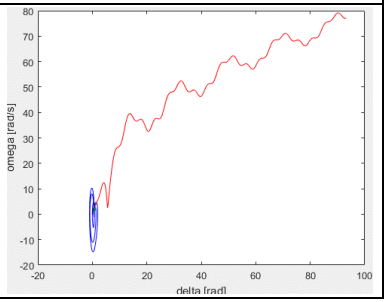
Generator 3

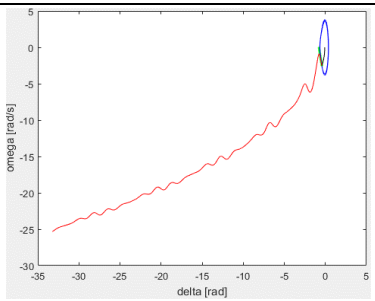
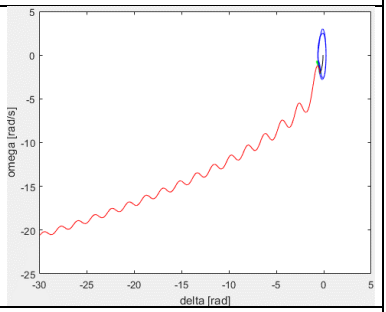
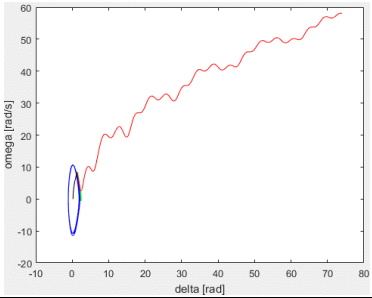
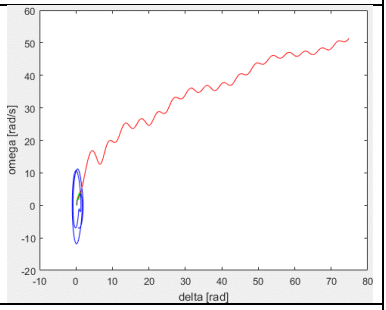
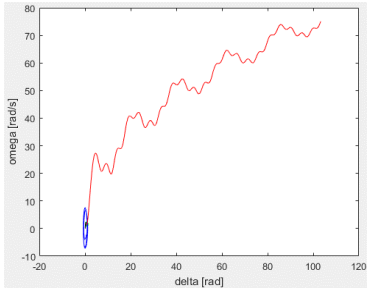
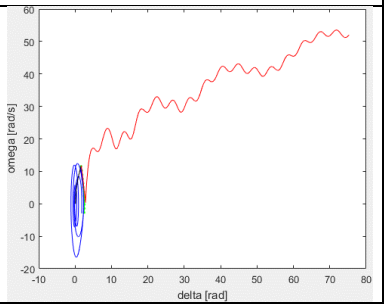


c. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.005 detik setara 0.2 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

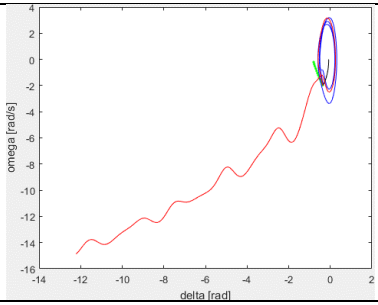
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

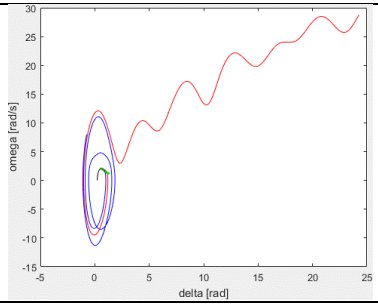
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

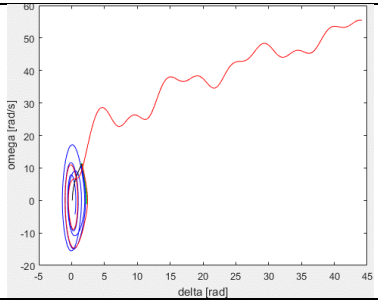
Generator 1



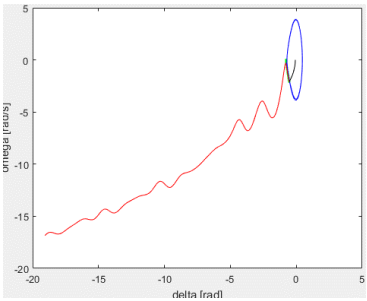
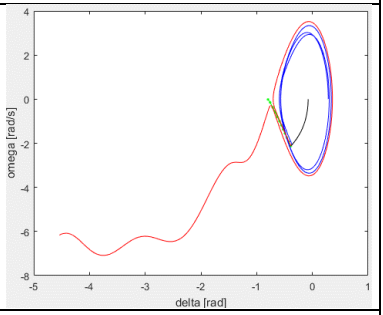
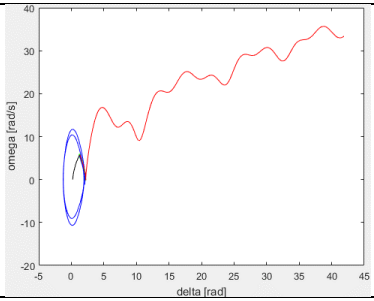
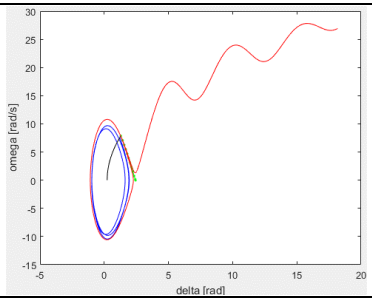
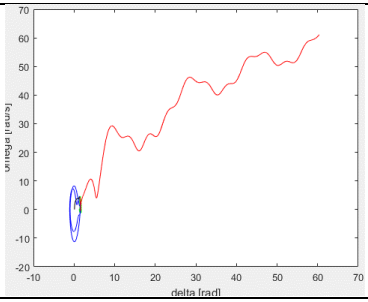
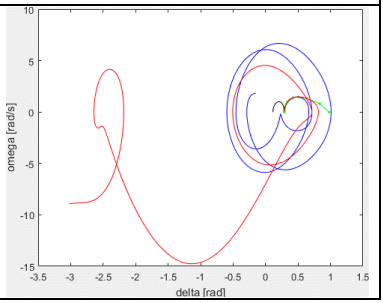
Generator 2

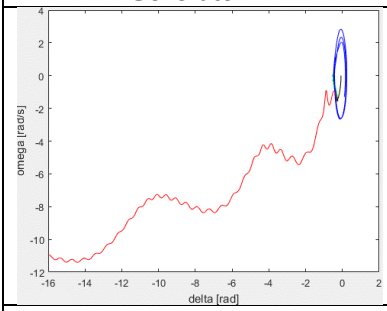
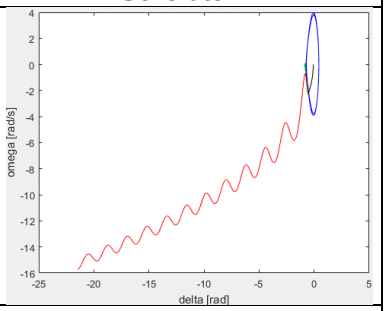
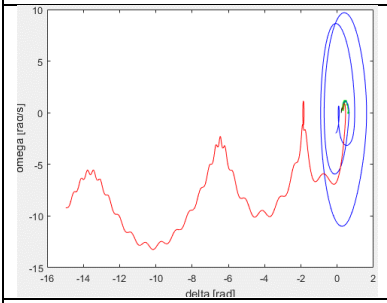
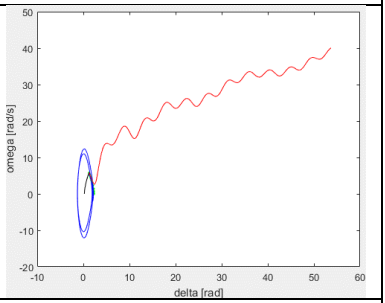
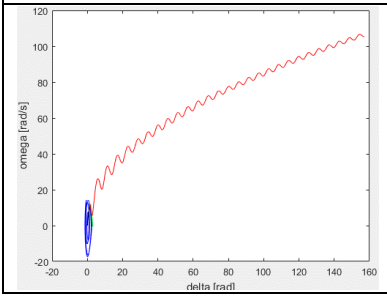
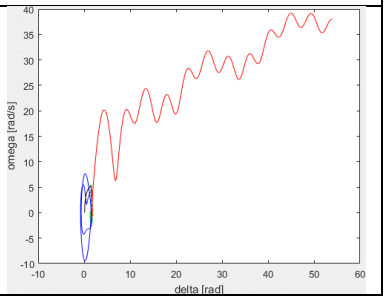


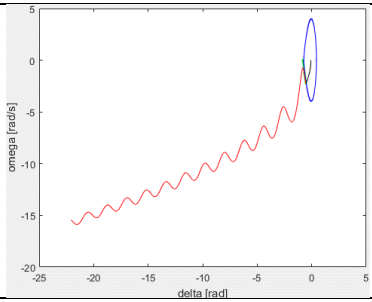
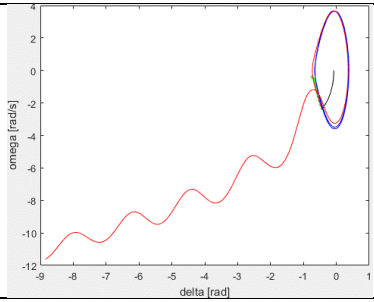
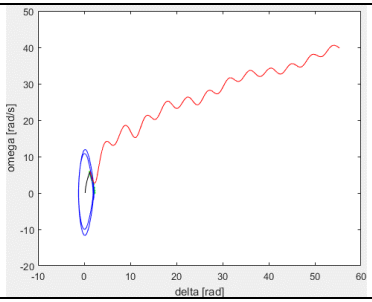
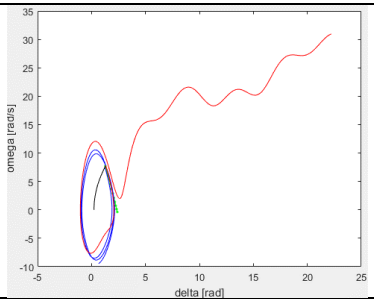
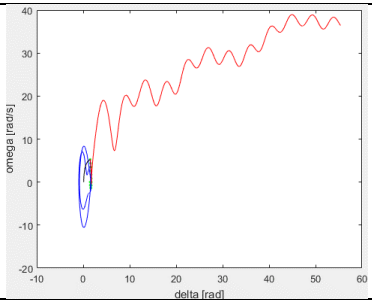
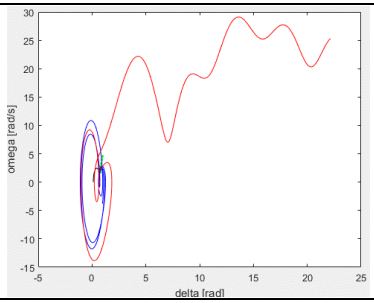
Generator 3

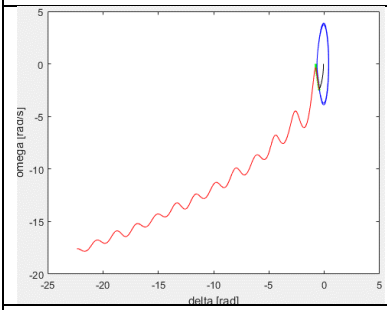
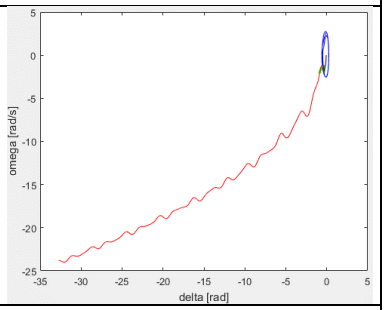
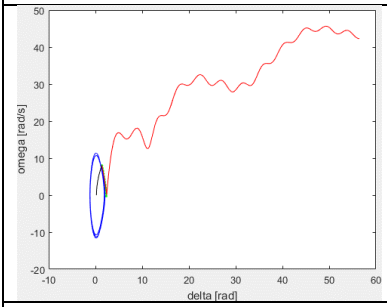
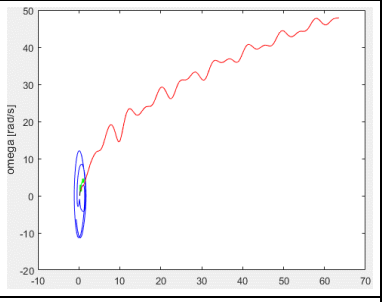
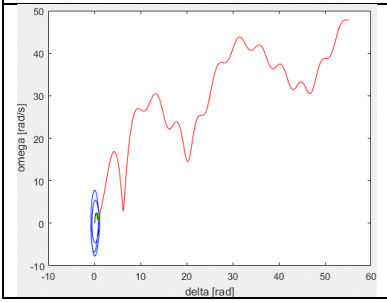
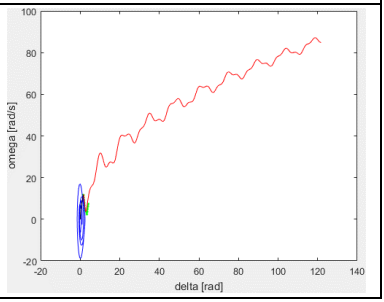


d. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.003 detik setara 0.3 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

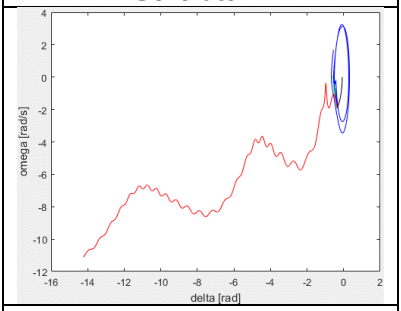
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

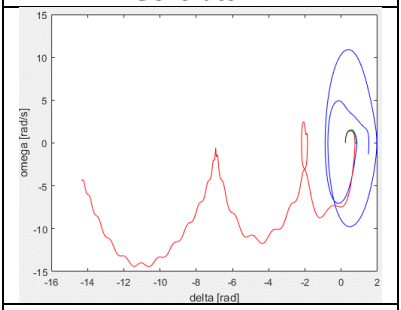
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

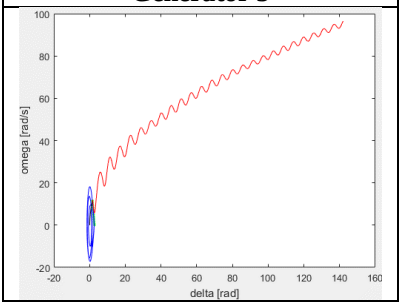
Generator 1



Generator 2

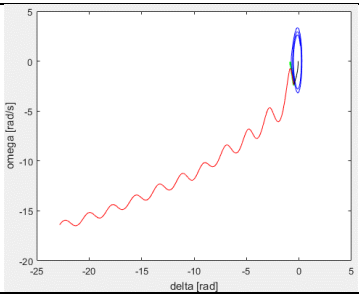
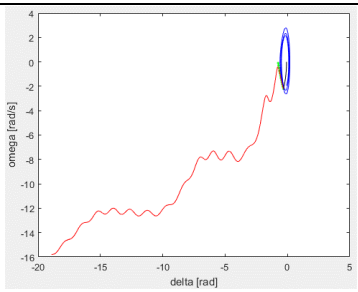
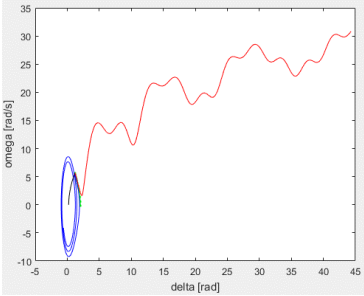
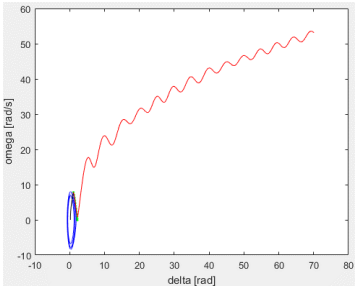
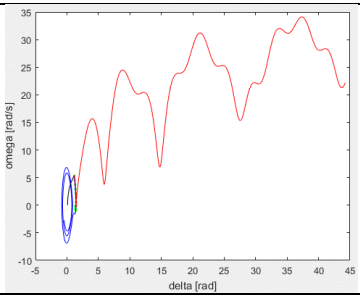
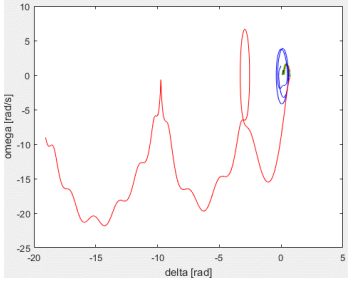


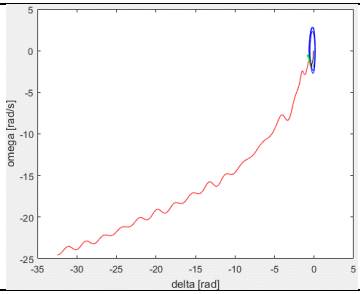
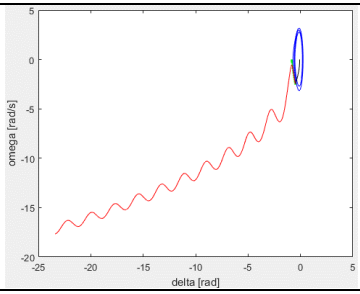
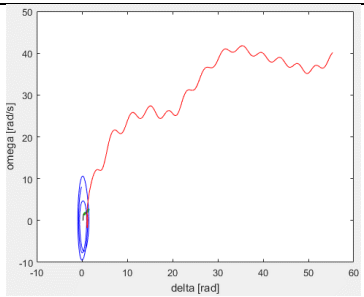
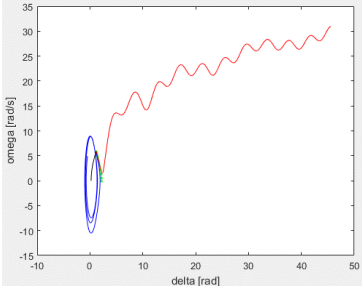
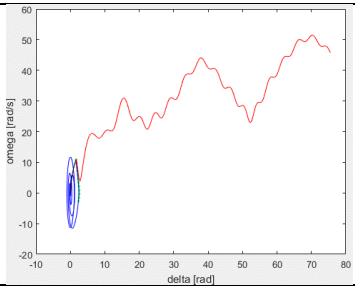
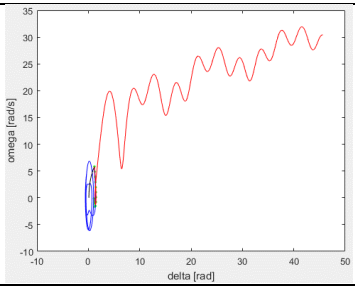
Generator 3

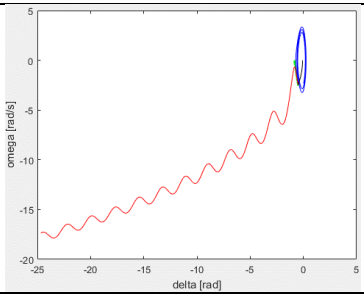
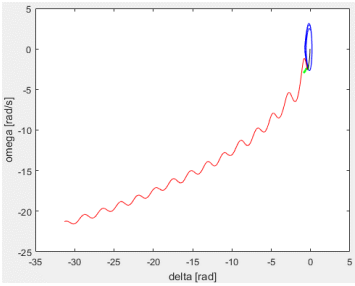
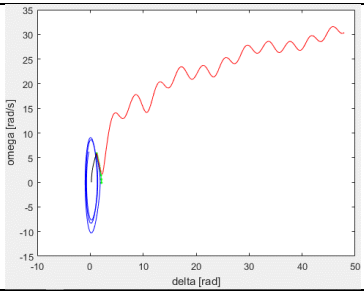
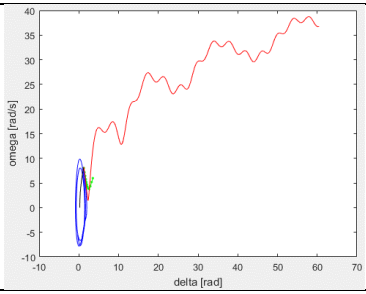
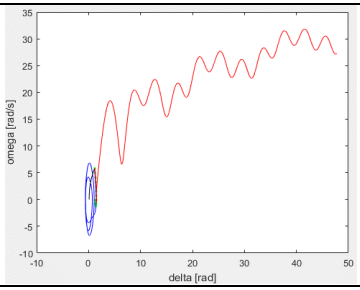
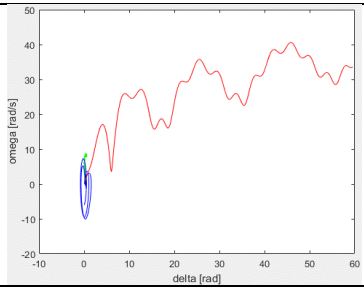


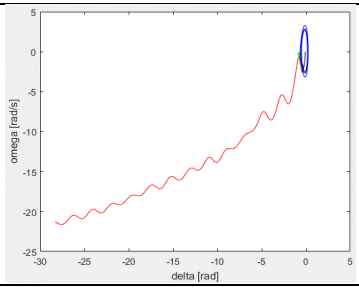
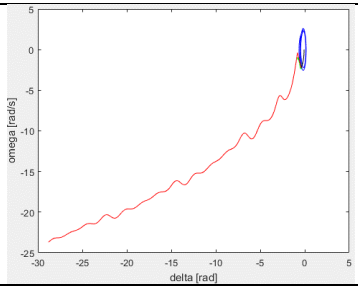
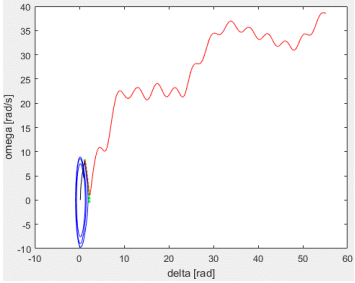
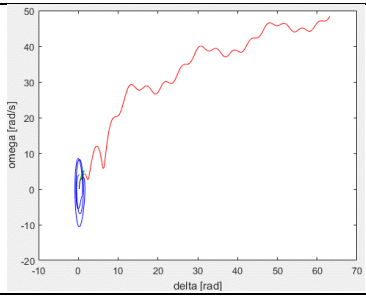
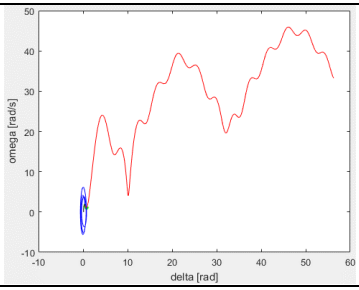
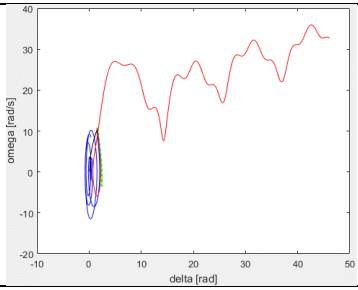
B. Grafik Omega terhadap Delta saat Sistem dengan *Damping* 1%

a. Grafik sistem tanpa SCES

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

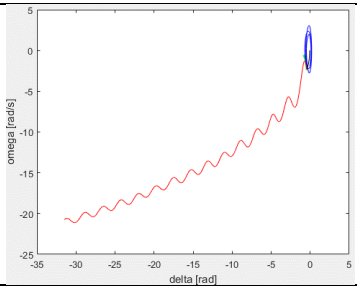
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

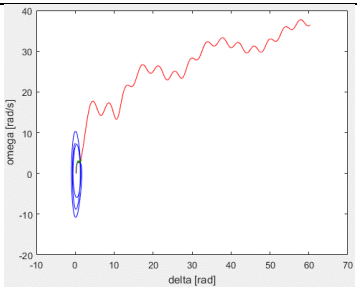
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

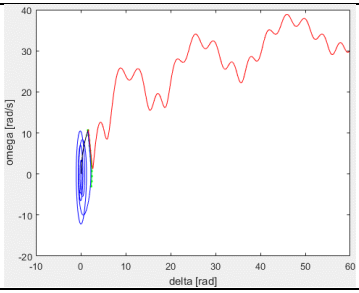
Generator 1



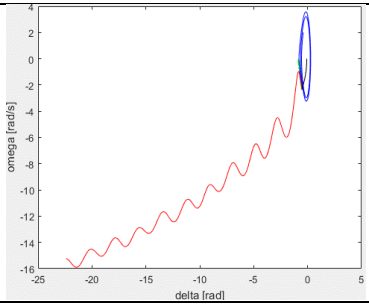
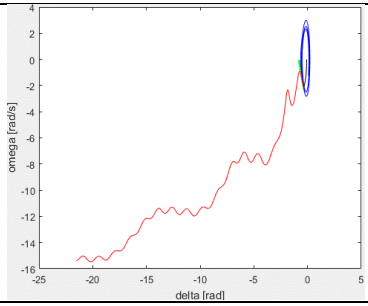
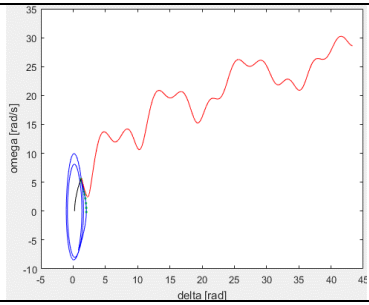
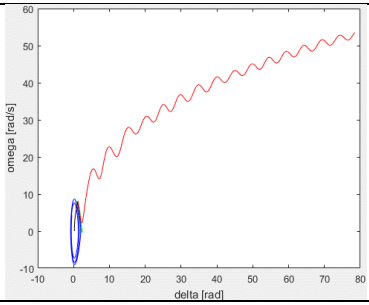
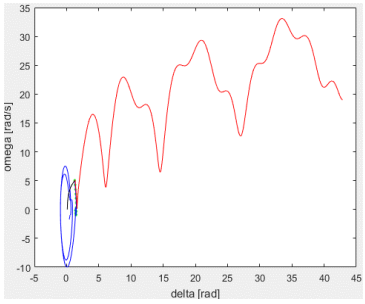
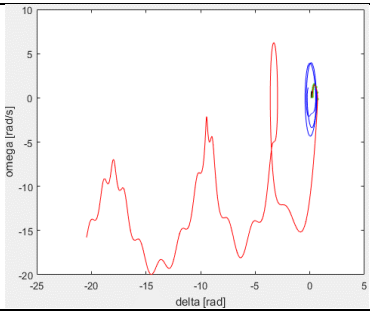
Generator 2

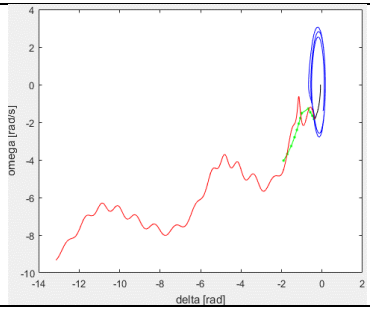
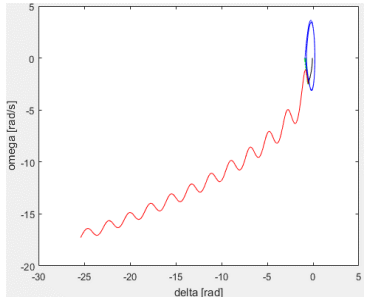
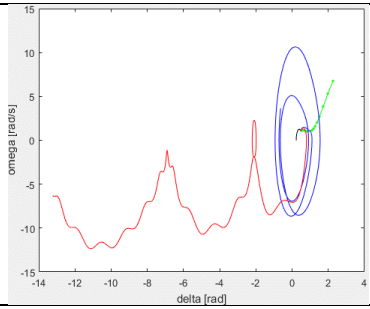
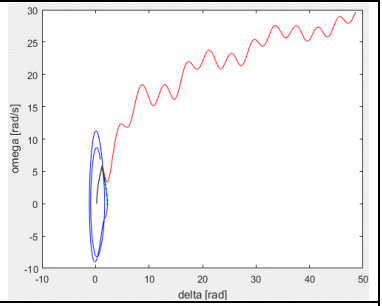
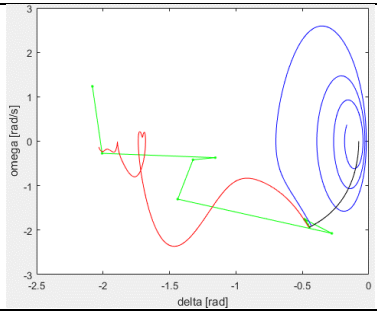
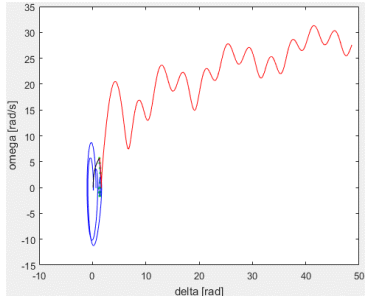


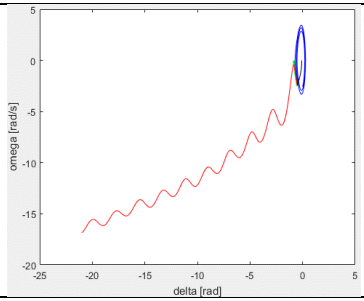
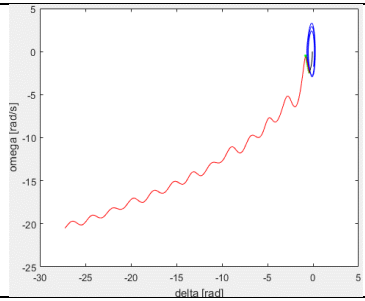
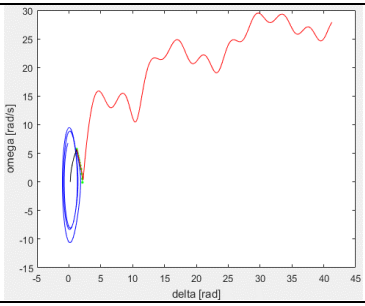
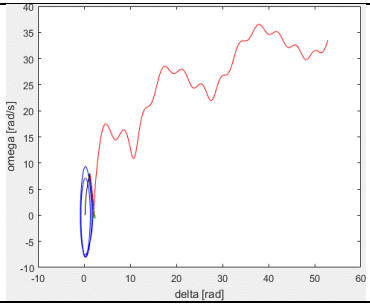
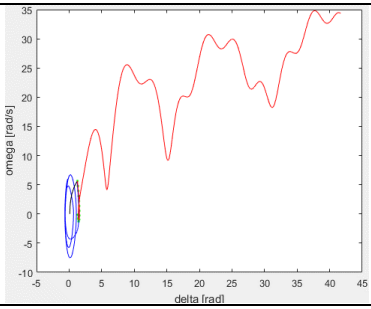
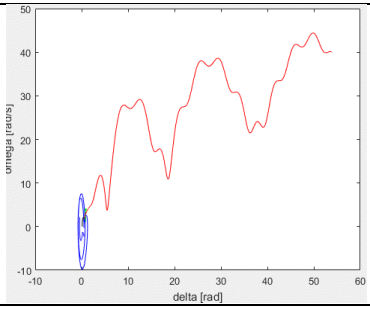
Generator 3

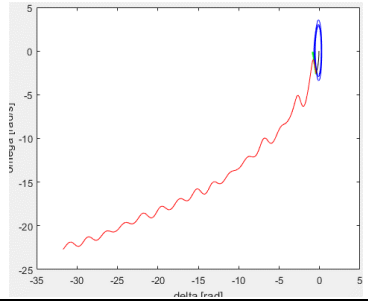
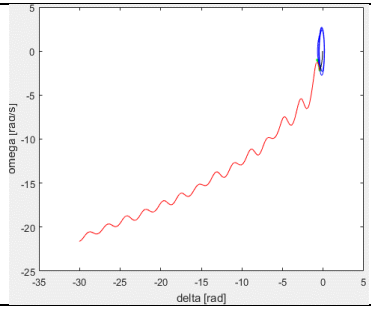
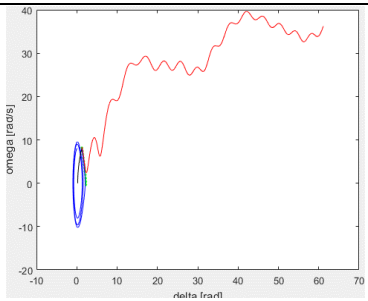
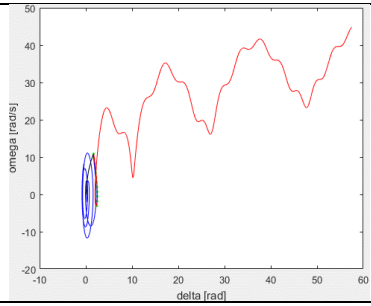
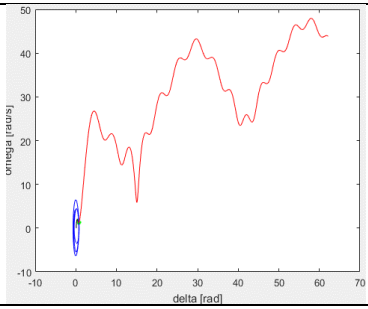
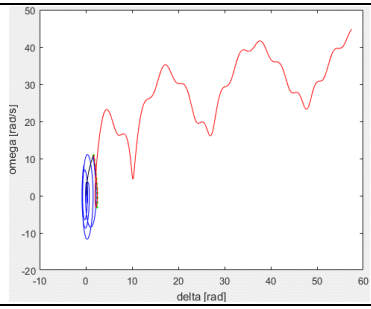


b. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.010 detik setara 0.1 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

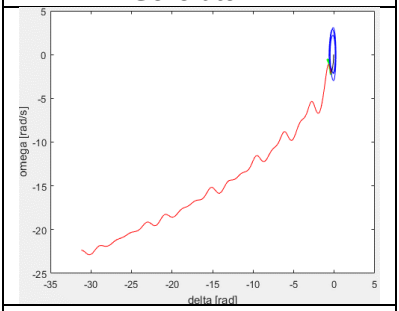
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

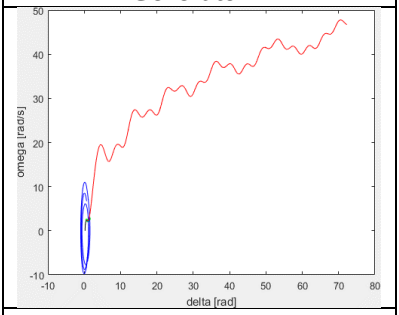
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

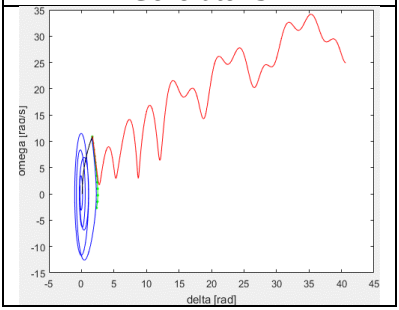
Generator 1



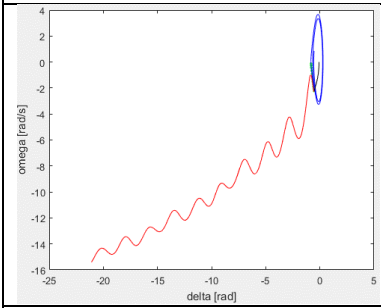
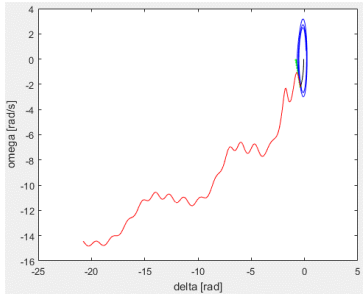
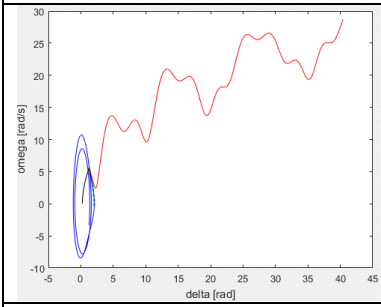
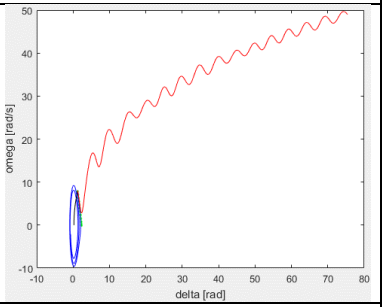
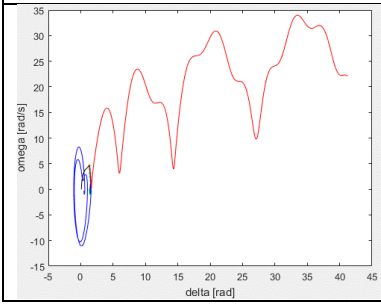
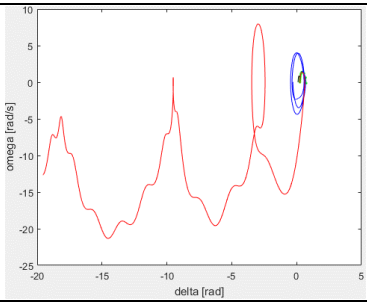
Generator 2

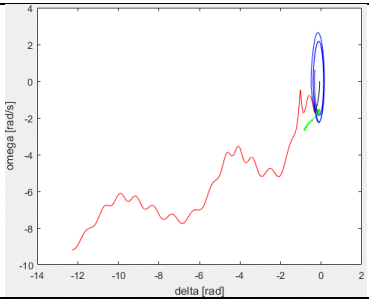
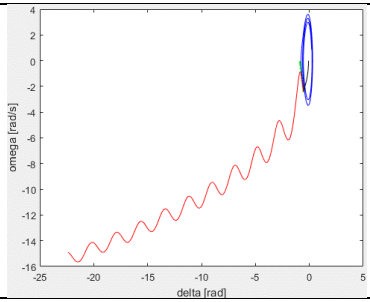
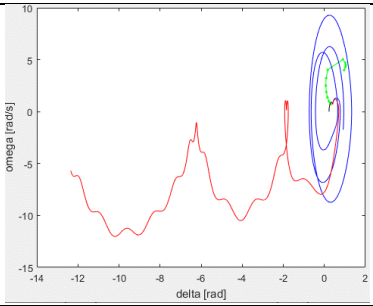
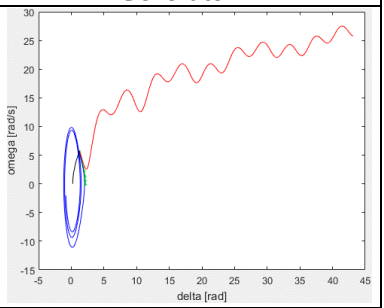
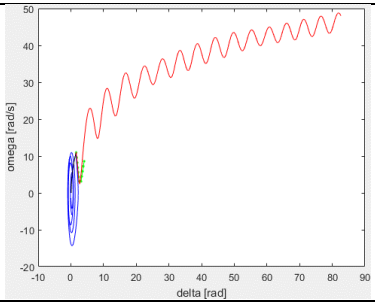
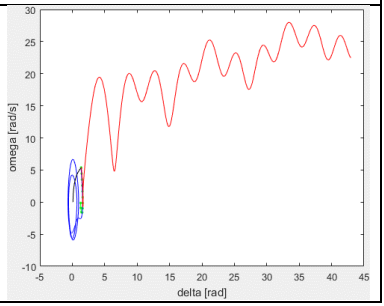


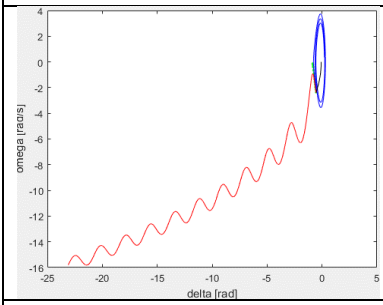
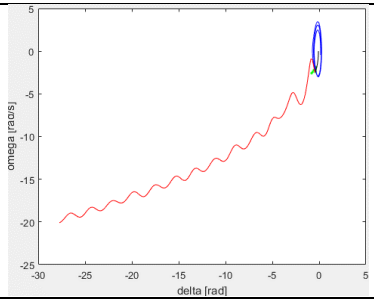
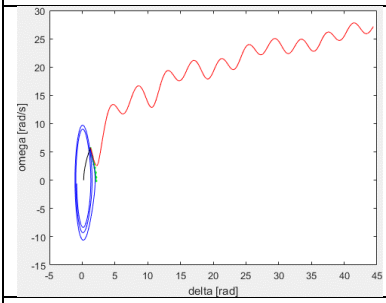
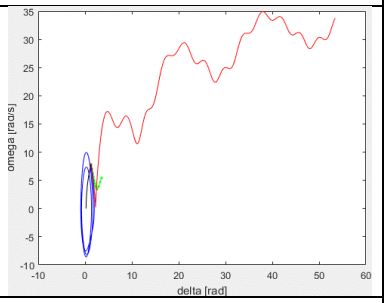
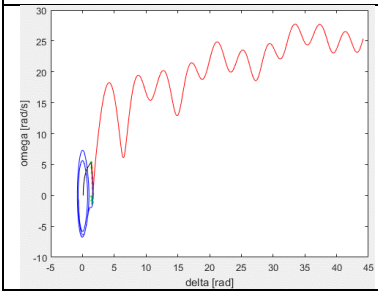
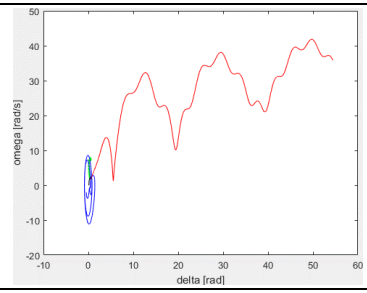
Generator 3

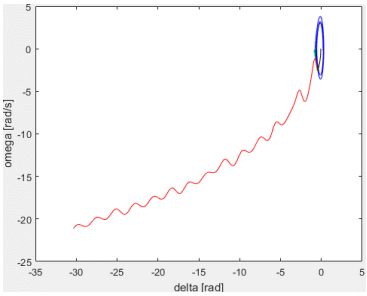
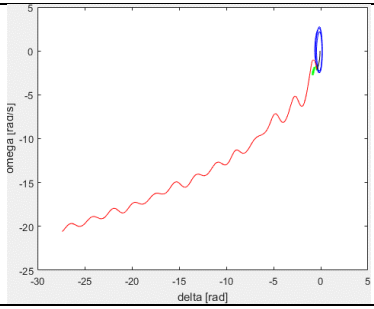
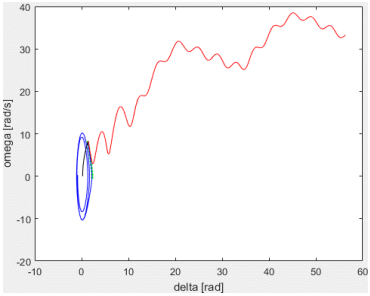
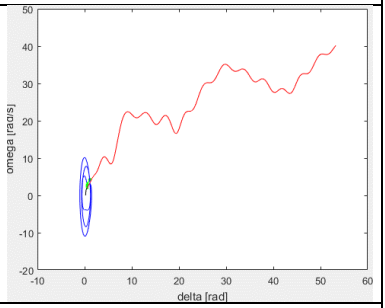
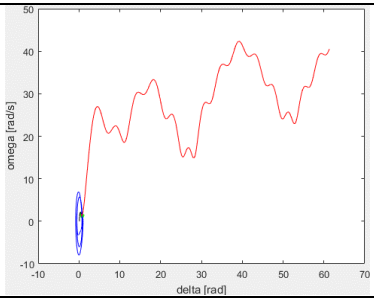
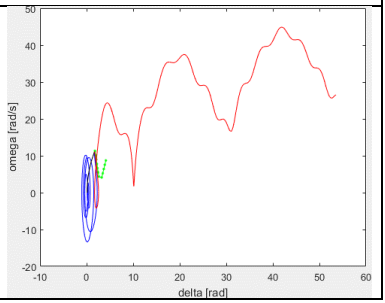


c. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.005 detik setara 0.2 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

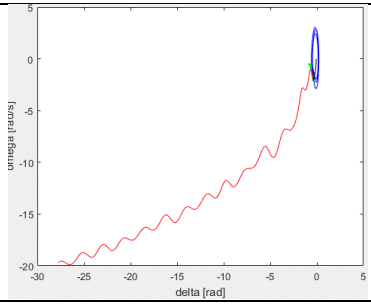
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

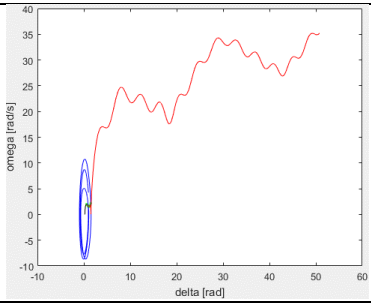
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

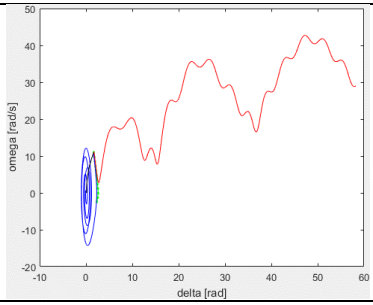
Generator 1



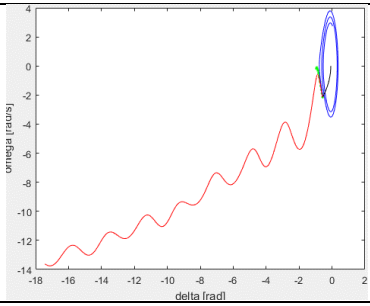
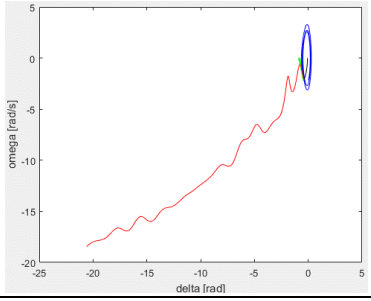
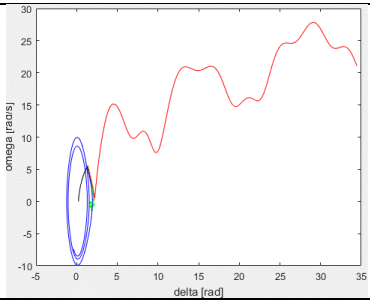
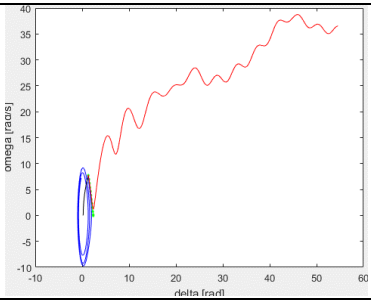
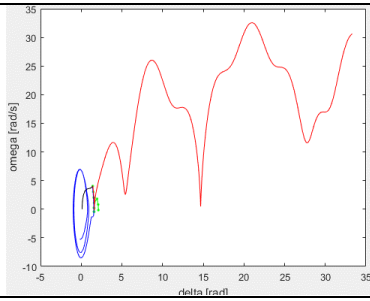
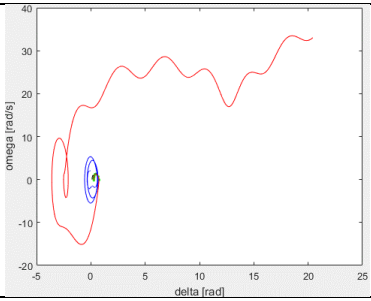
Generator 2

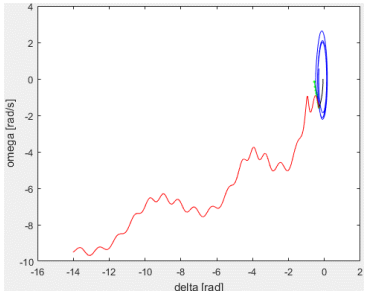
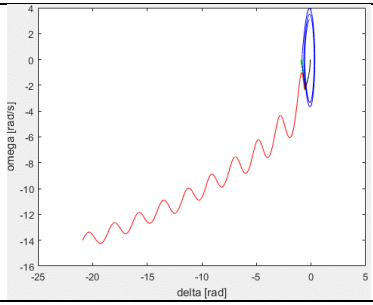
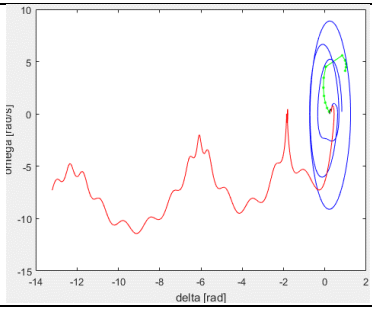
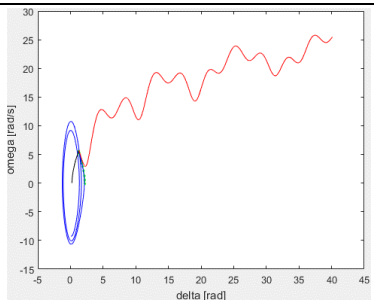
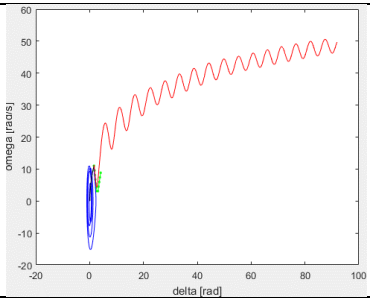
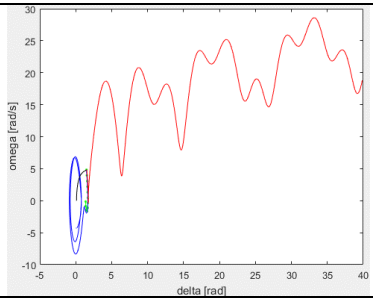


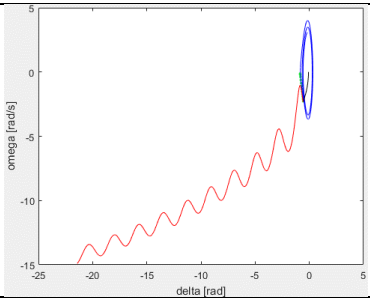
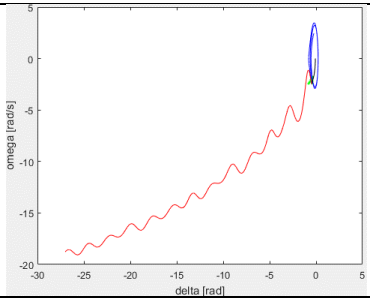
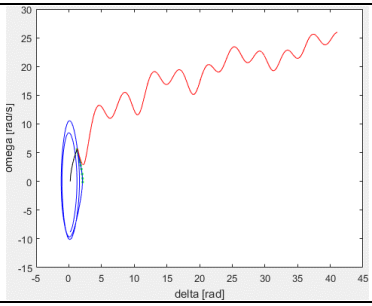
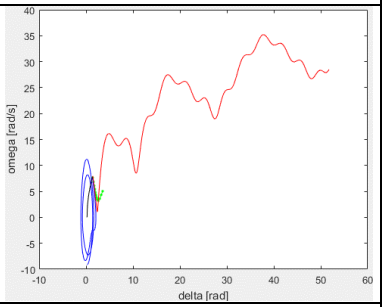
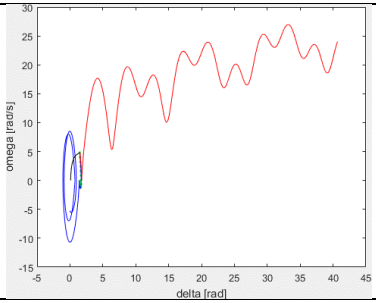
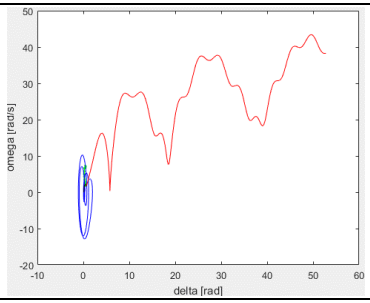
Generator 3

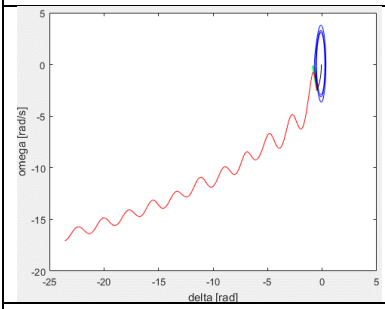
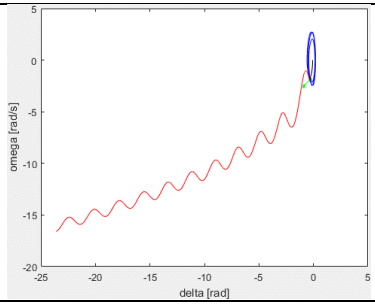
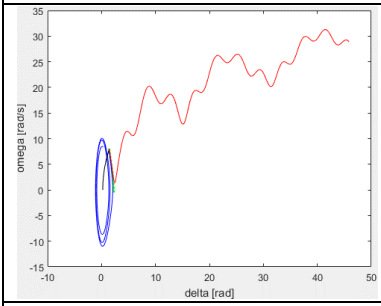
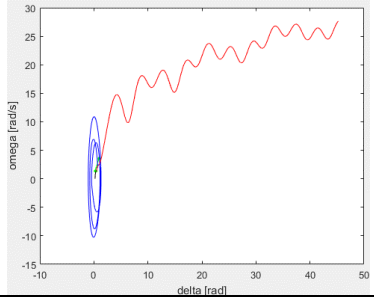
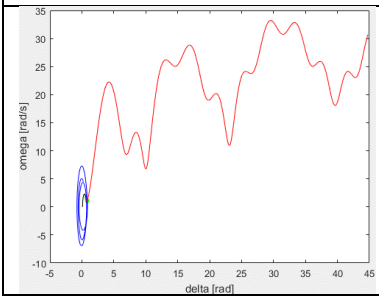
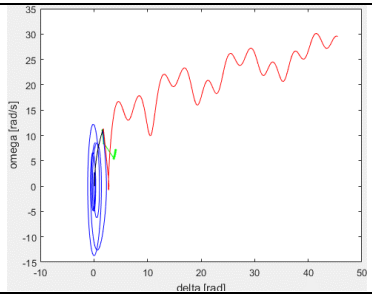


d. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.003 detik setara 0.3 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

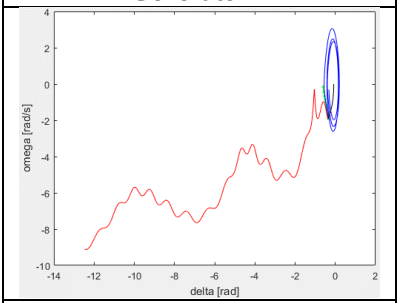
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

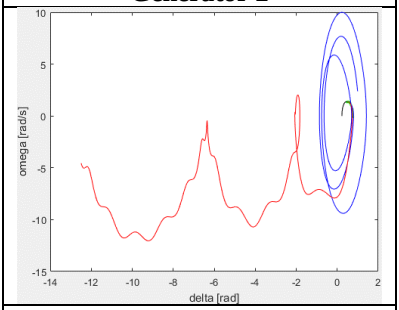
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

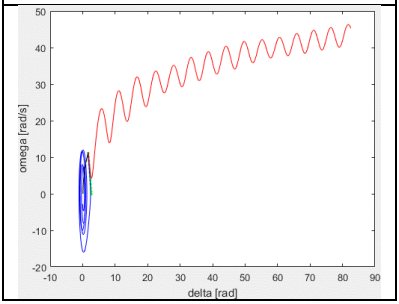
Generator 1



Generator 2

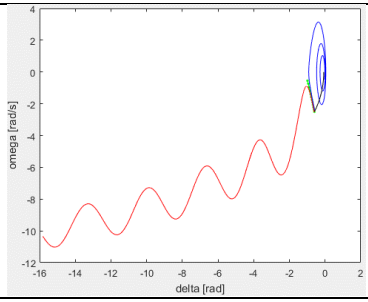
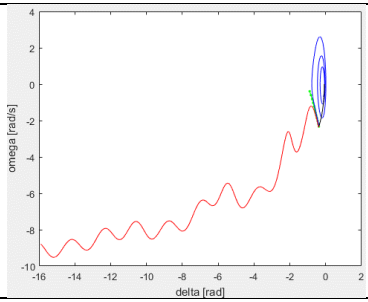
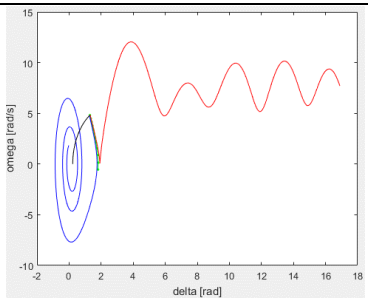
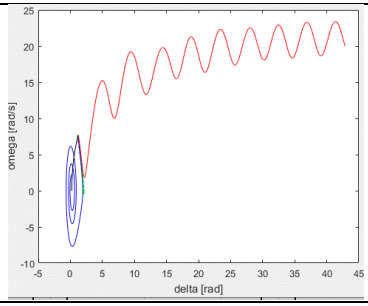
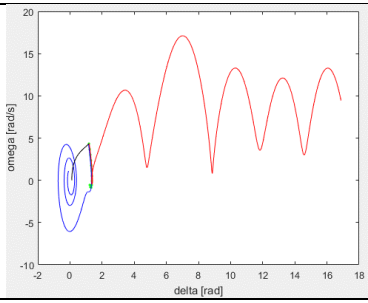
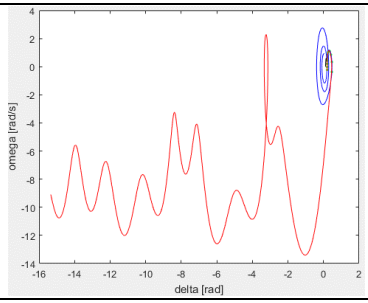


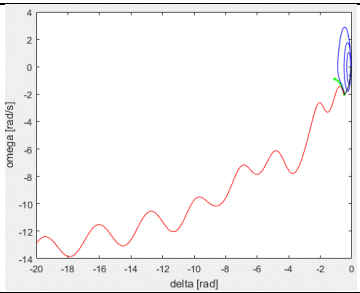
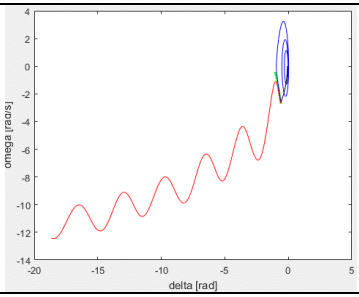
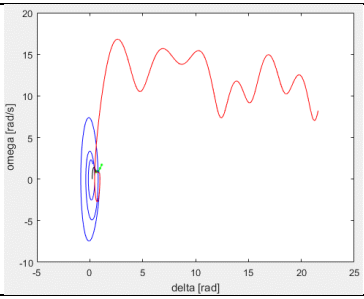
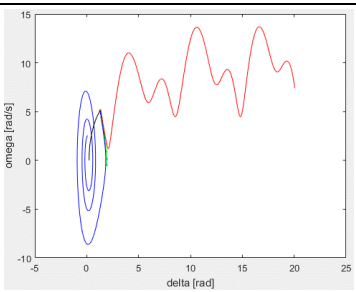
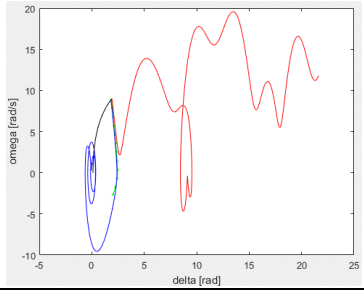
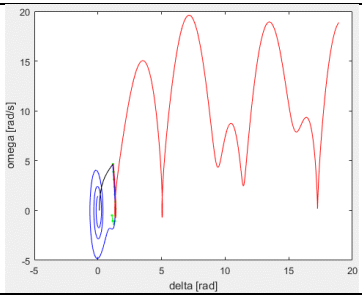
Generator 3

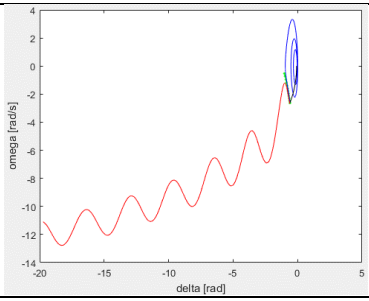
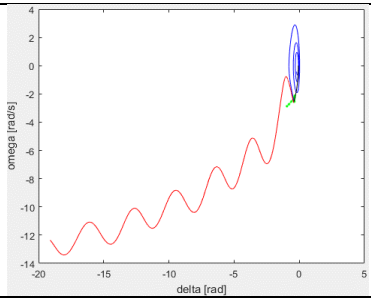
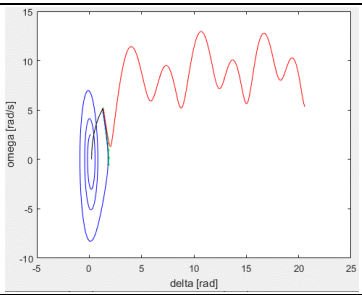
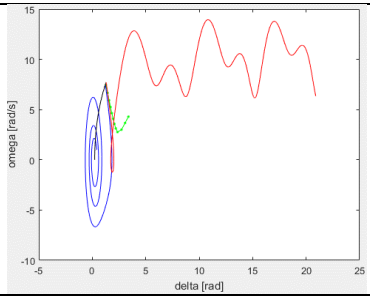
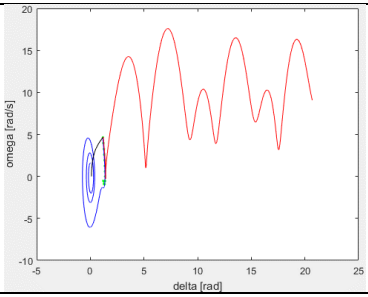
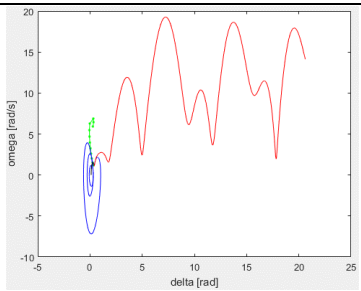


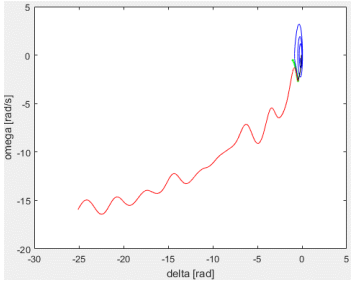
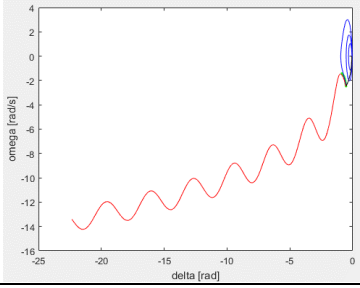
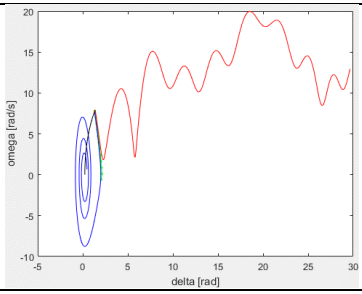
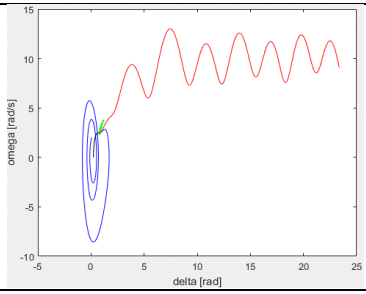
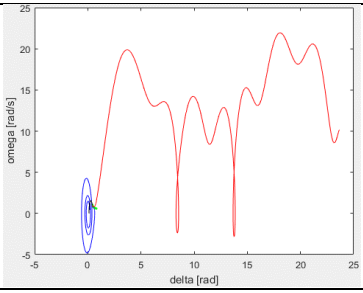
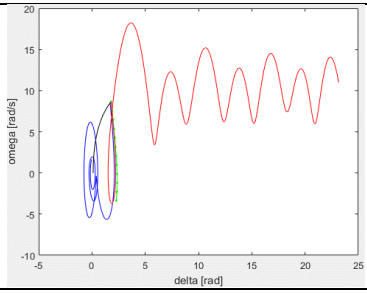
C. Grafik Omega terhadap Delta saat Sistem dengan *Damping* 5%

a. Grafik sistem tanpa SCES

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

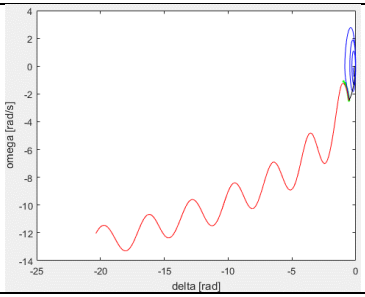
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

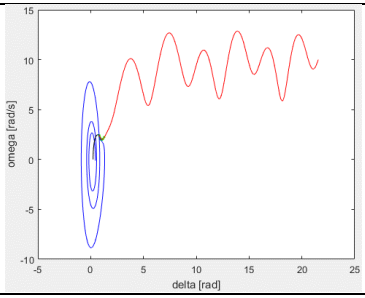
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

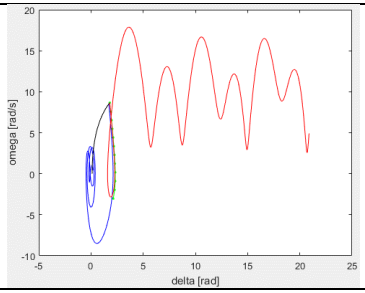
Generator 1



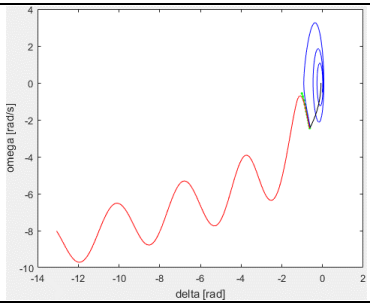
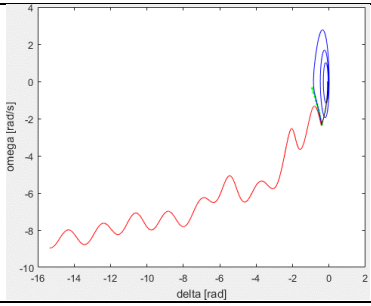
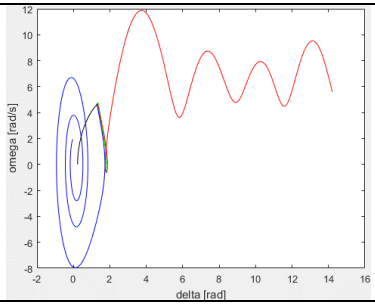
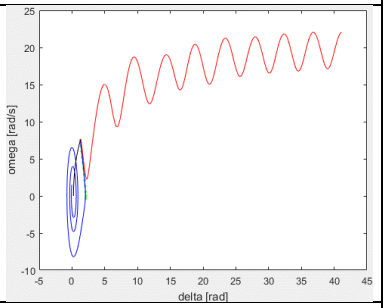
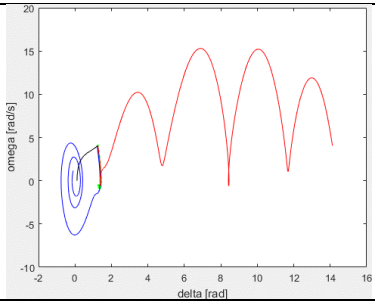
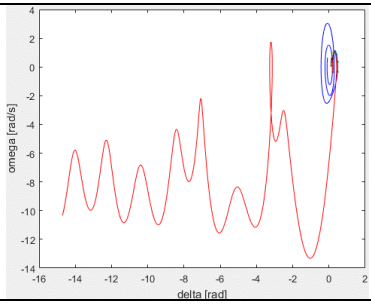
Generator 2

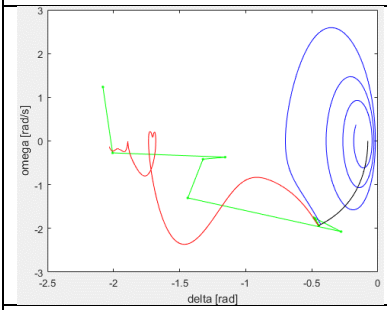
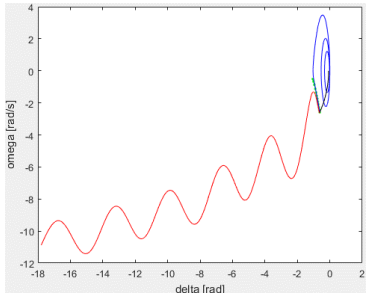
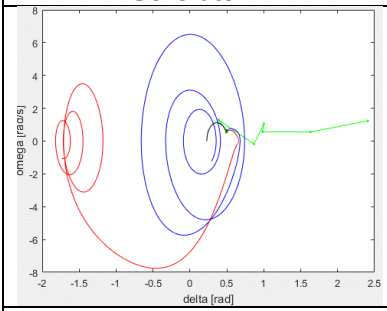
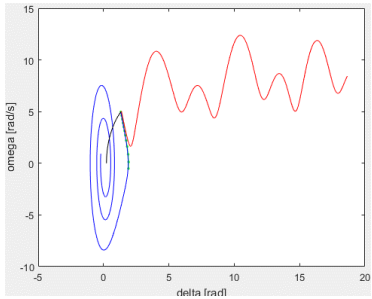
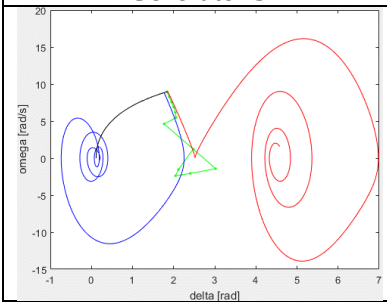
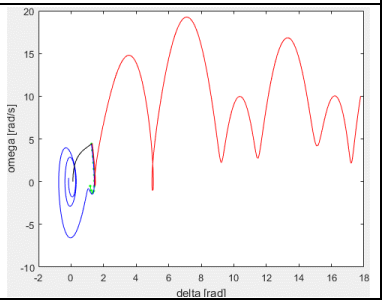


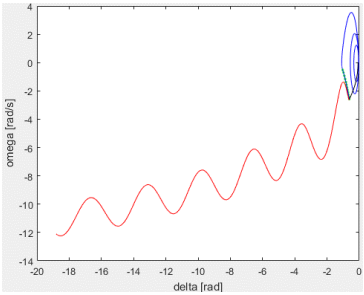
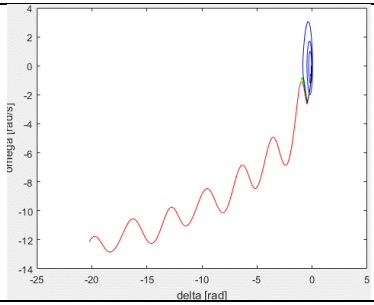
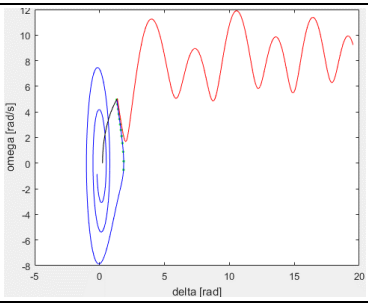
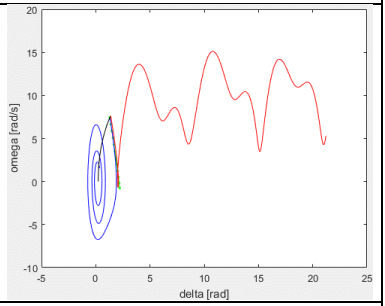
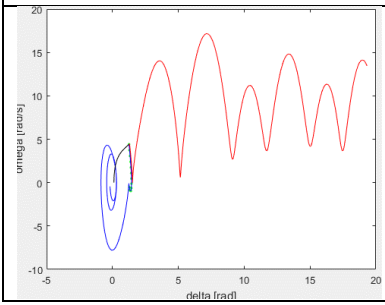
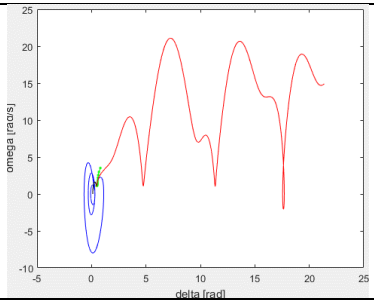
Generator 3

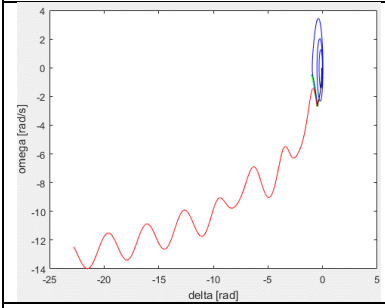
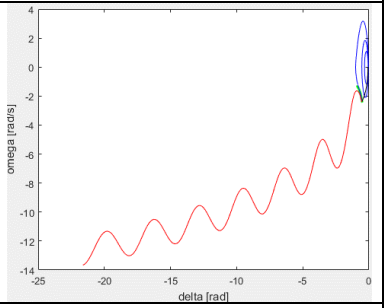
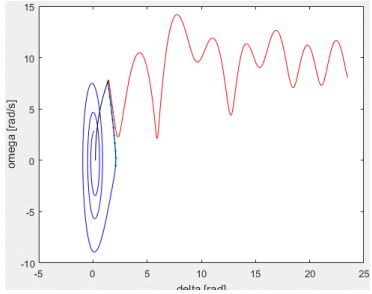
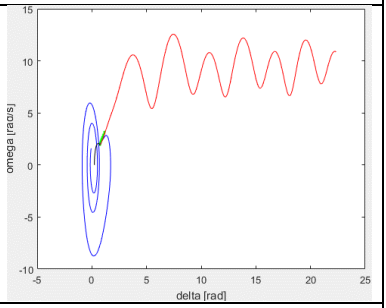
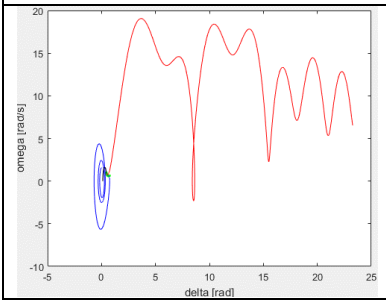
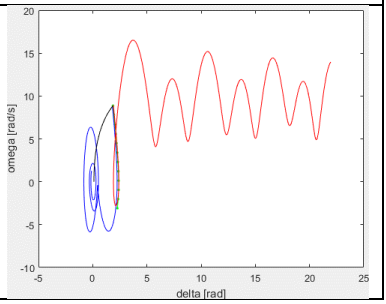


b. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.010 detik setara 0.1 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

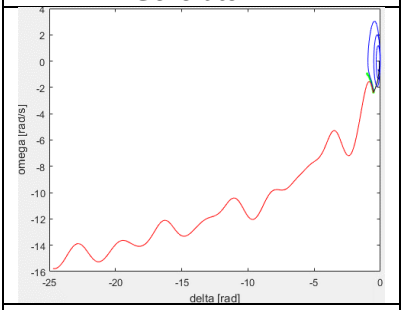
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

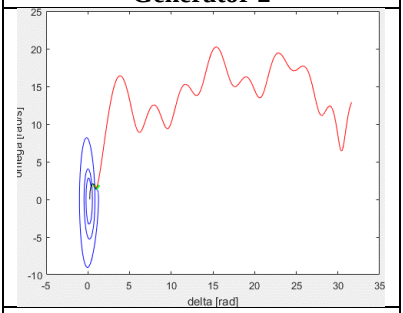
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

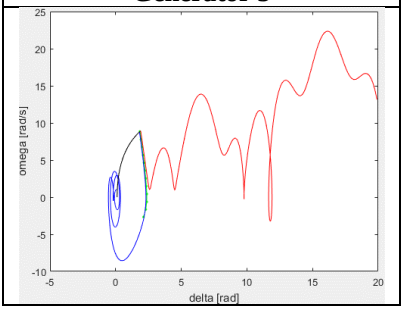
Generator 1



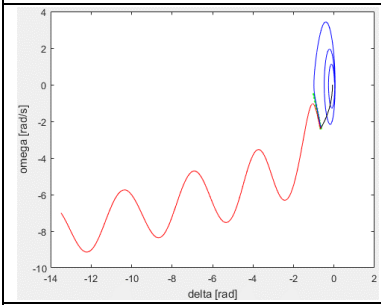
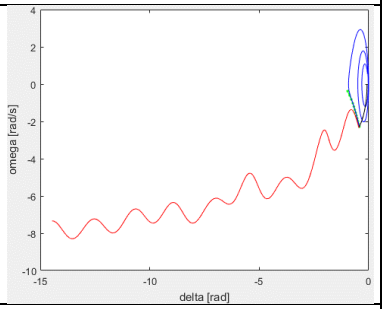
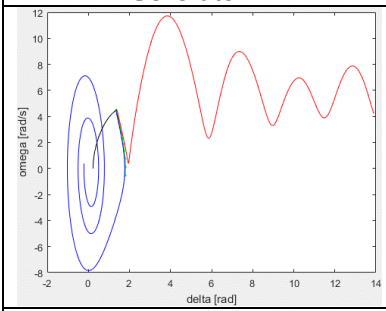
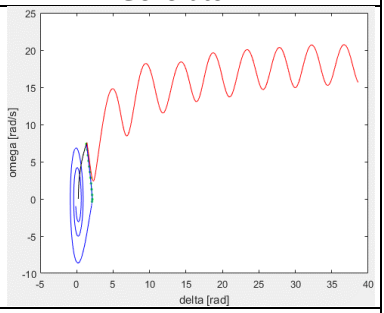
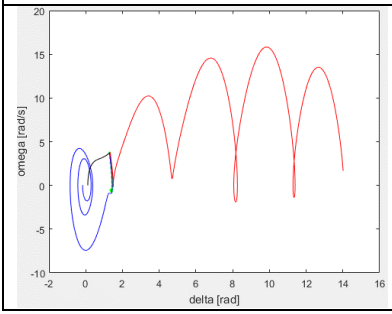
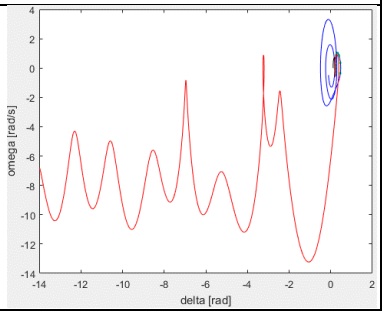
Generator 2

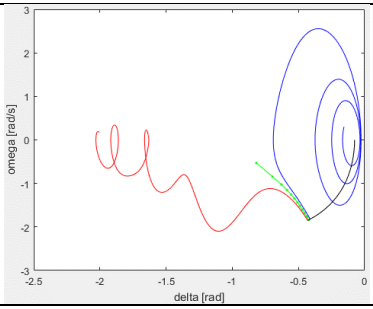
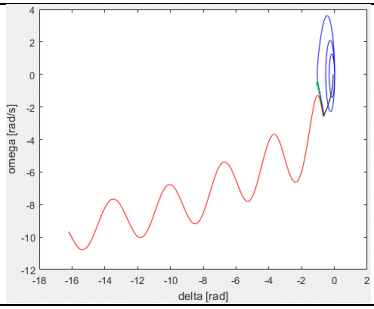
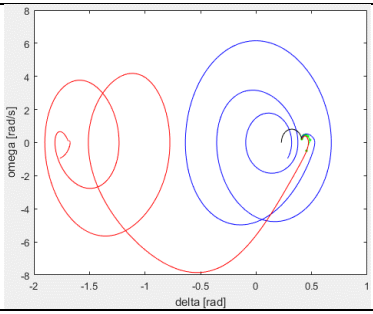
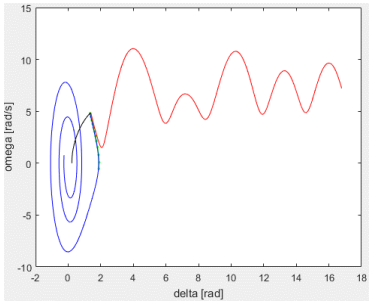
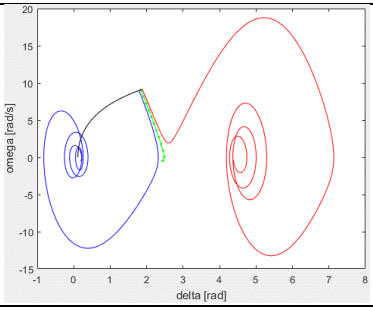
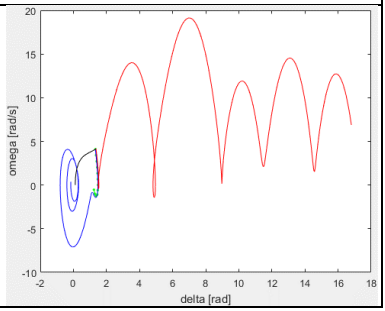


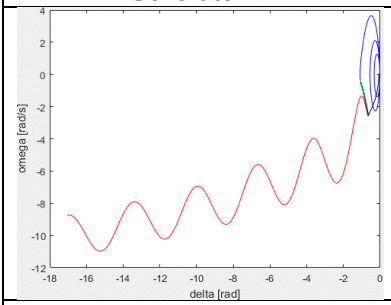
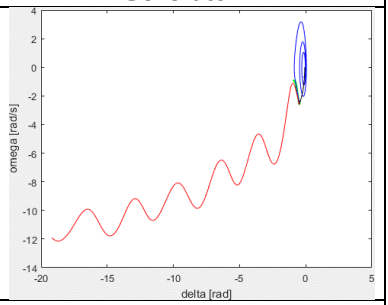
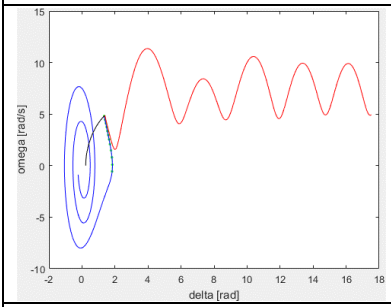
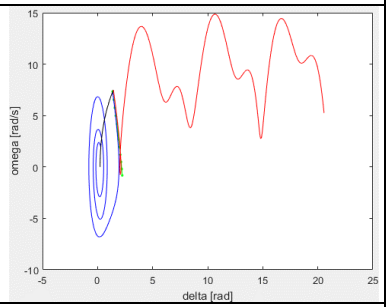
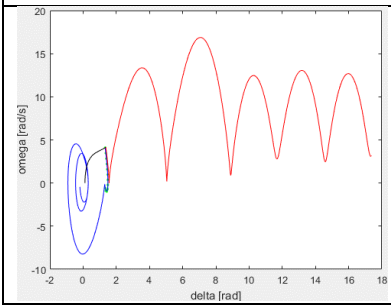
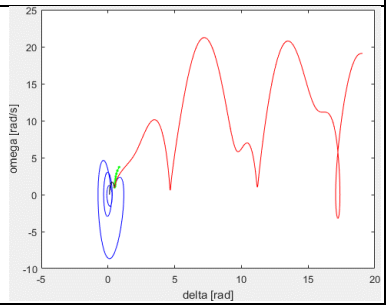
Generator 3

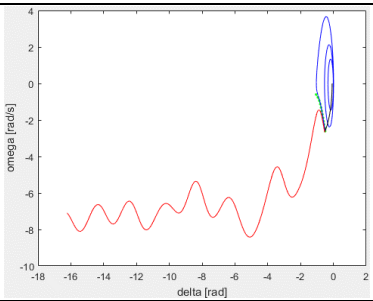
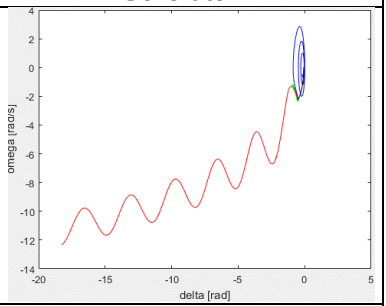
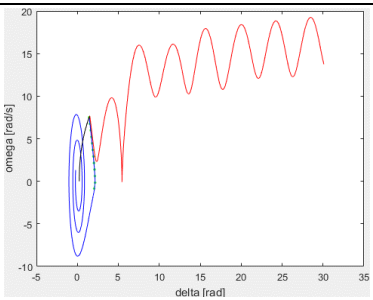
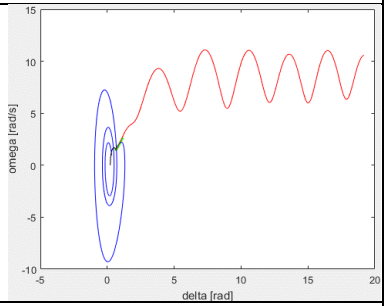
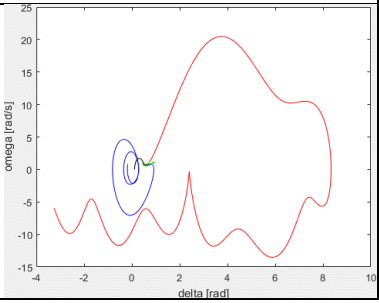
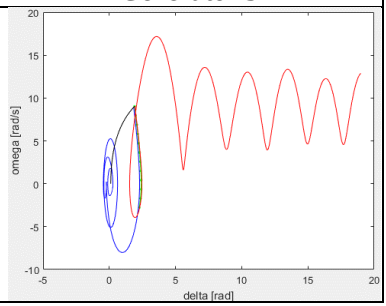


c. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.005 detik setara 0.2 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

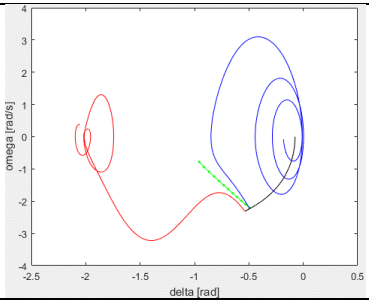
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

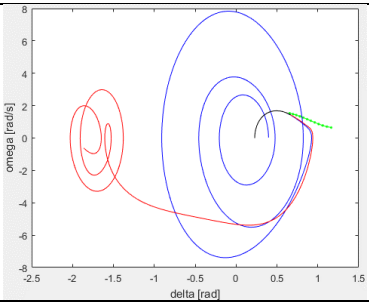
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

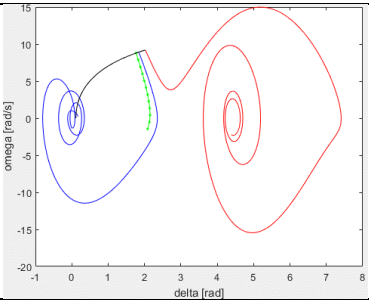
Generator 1



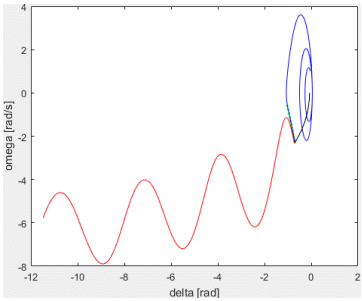
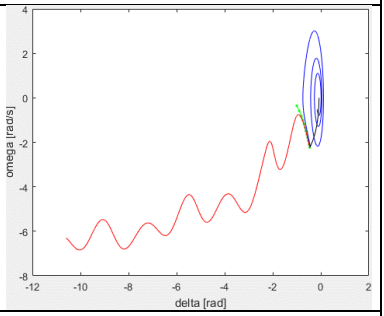
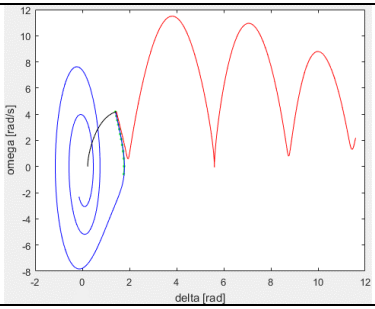
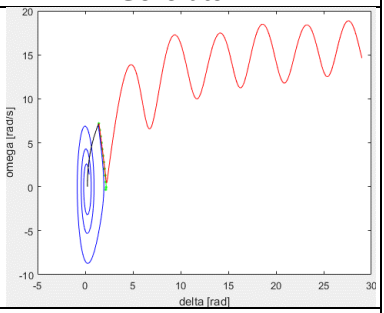
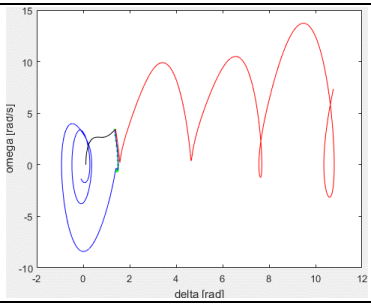
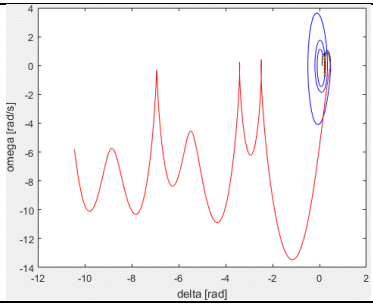
Generator 2

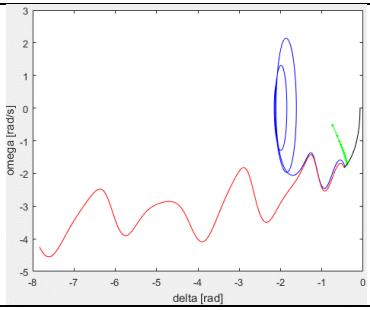
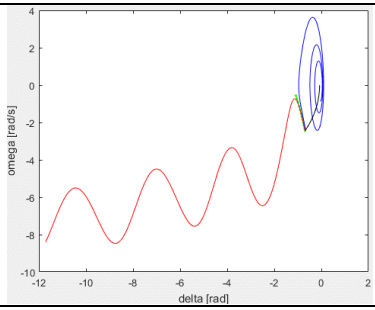
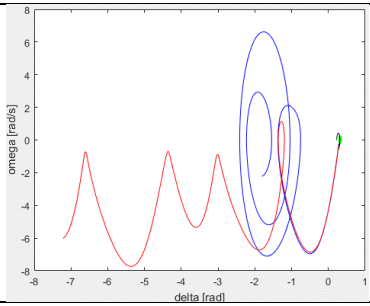
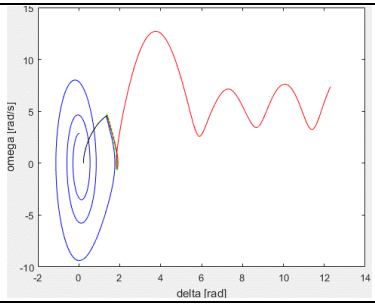
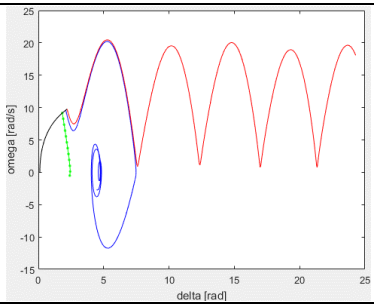
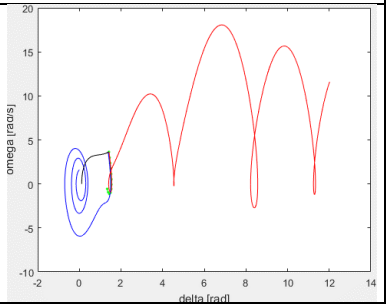


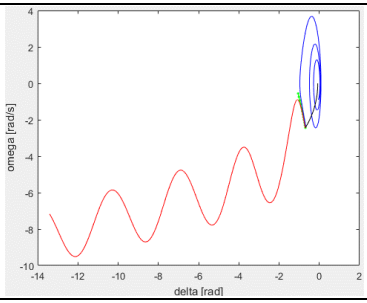
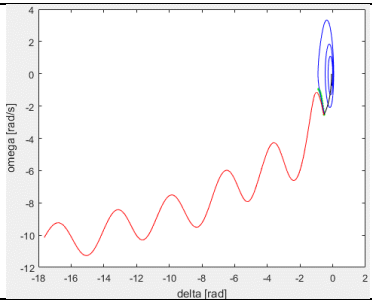
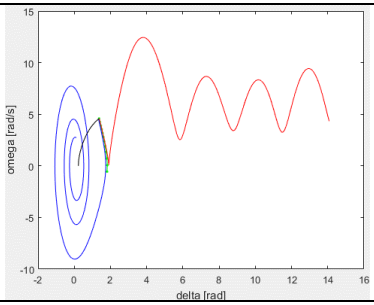
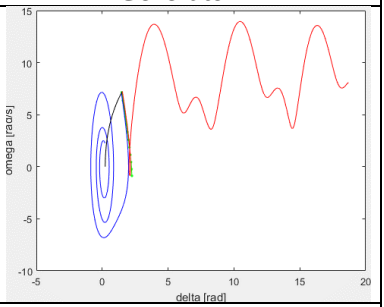
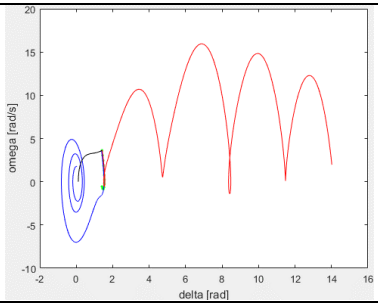
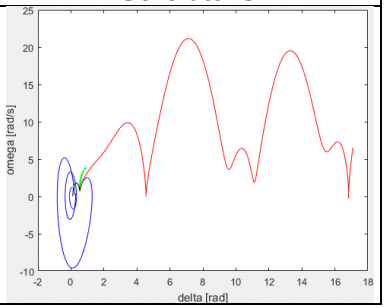
Generator 3

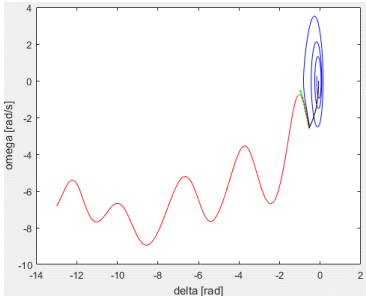
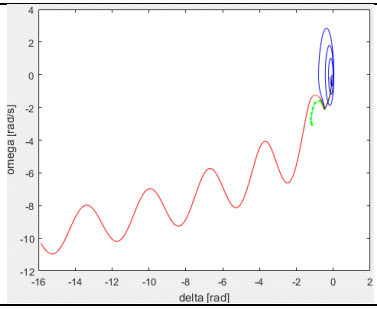
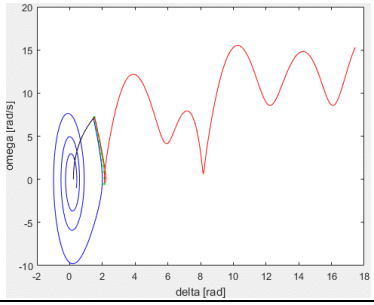
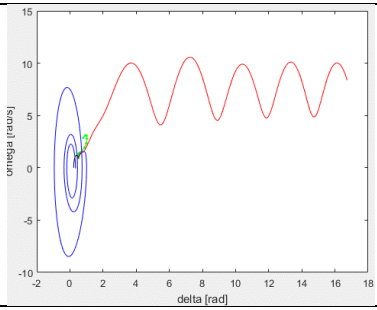
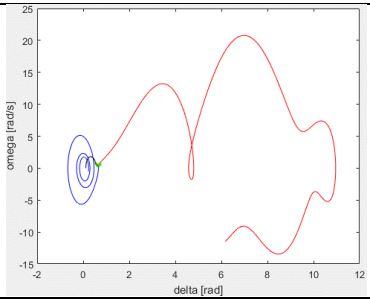
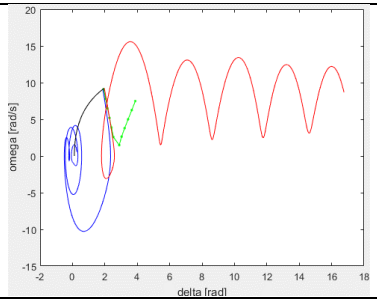


d. Grafik sistem dengan SCES bekerja 0.003 detik setara 0.3 p.u

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

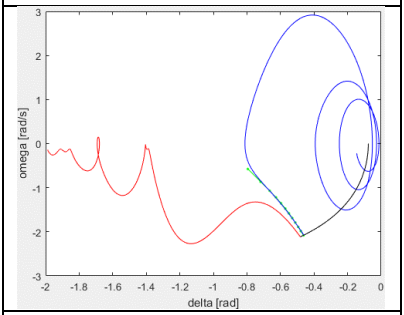
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

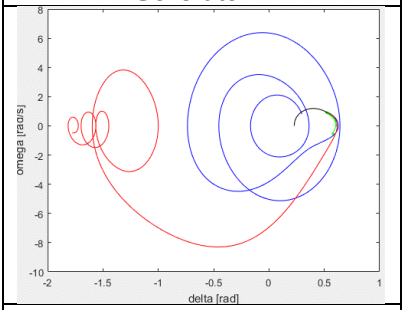
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

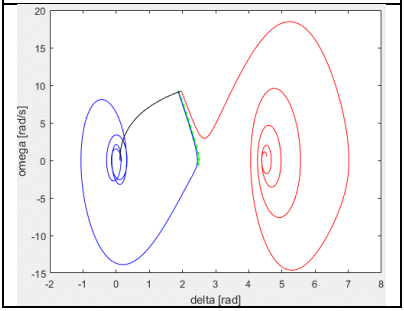
Generator 1



Generator 2

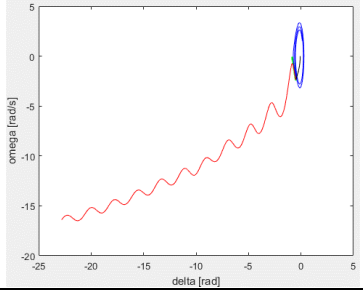
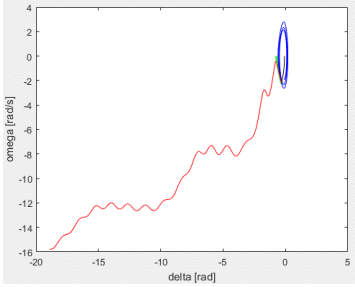
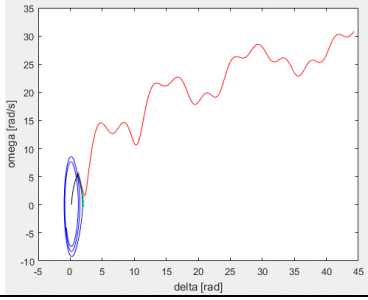
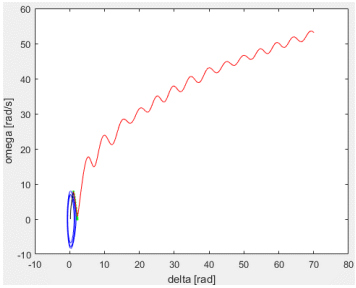
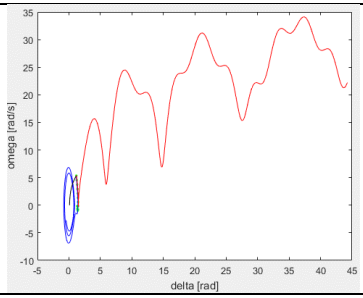
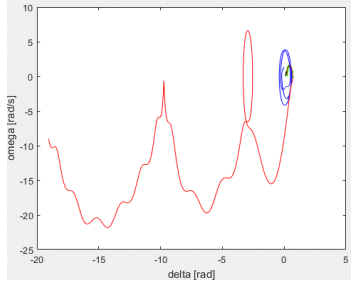


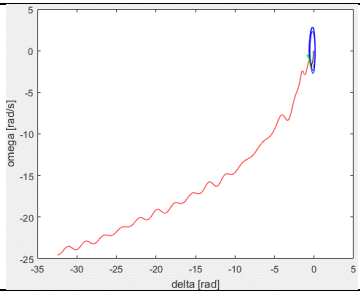
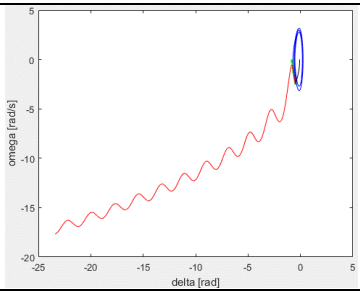
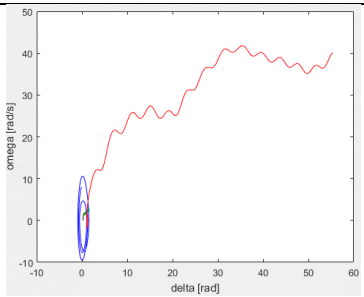
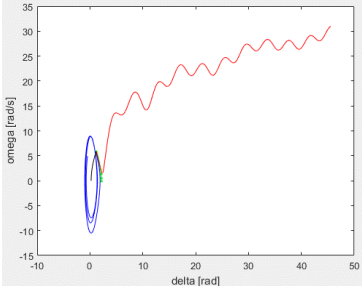
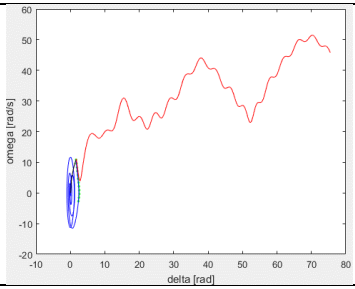
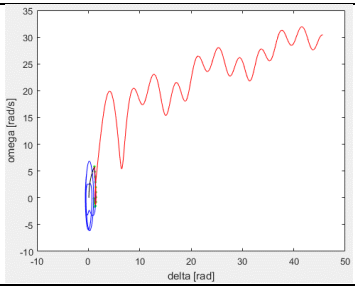
Generator 3

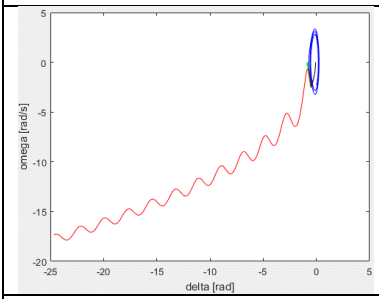
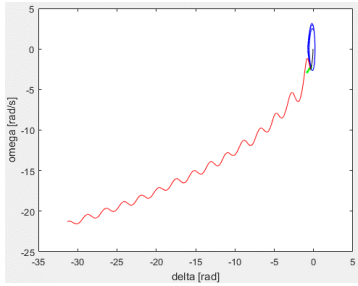
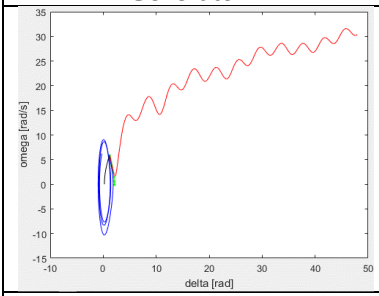
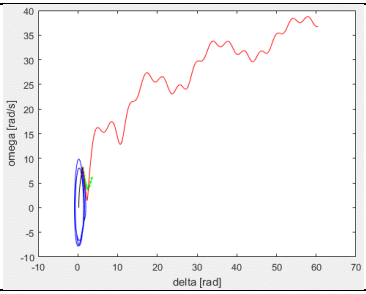
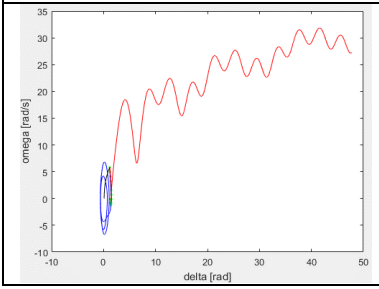
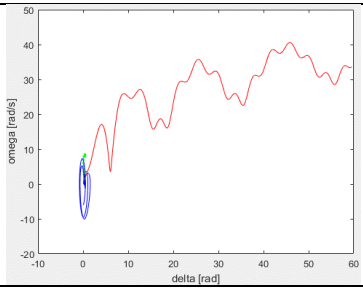


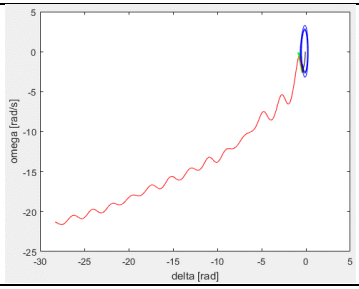
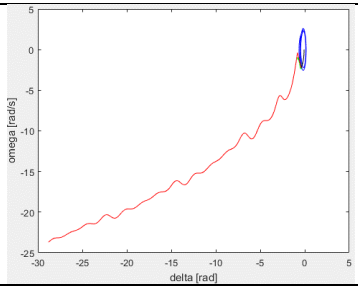
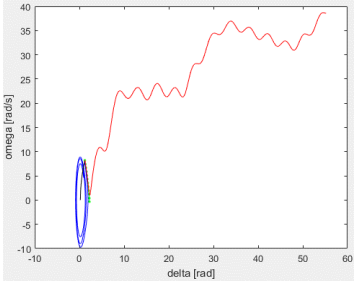
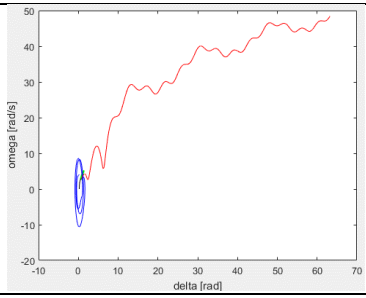
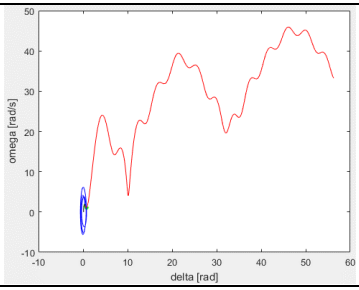
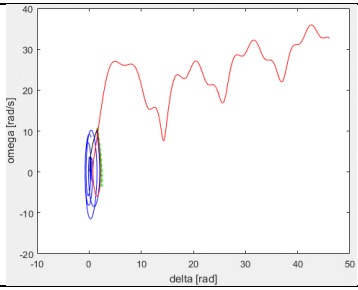
D. Grafik Omega terhadap Delta saat Sistem tanpa SCES hanya *Damping*

a. Grafik sistem dengan *Damping* 1%

Fault A	**Fault B**
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

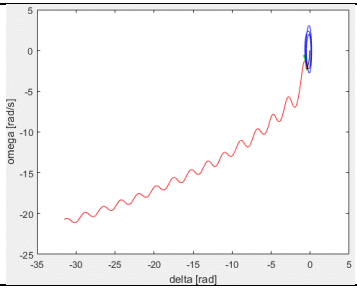
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

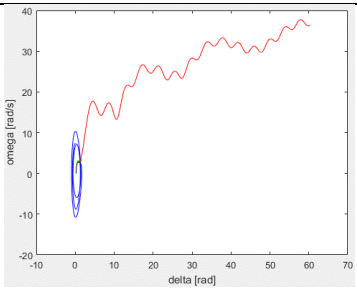
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

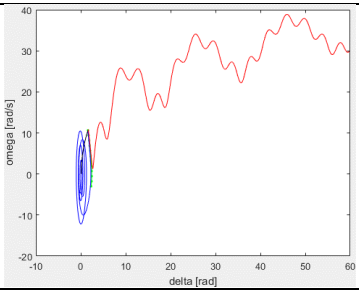
Generator 1



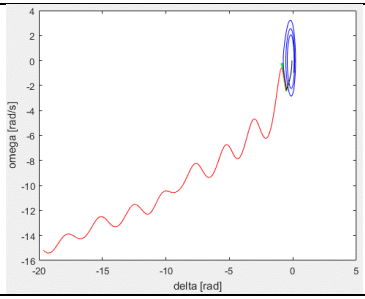
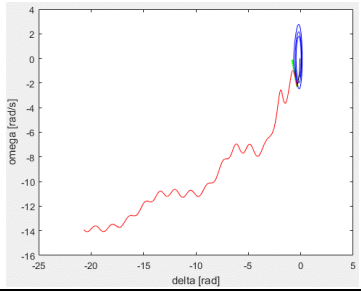
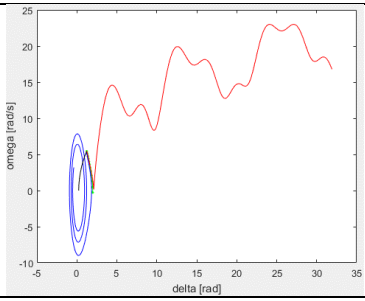
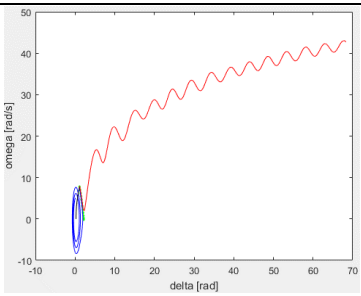
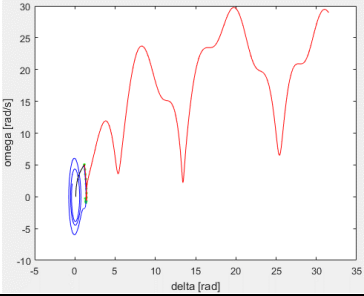
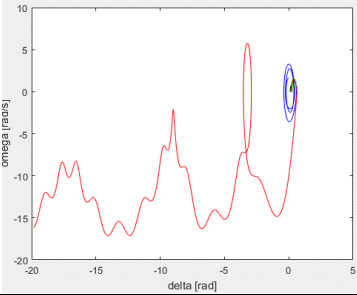
Generator 2

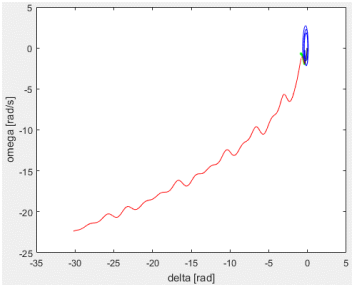
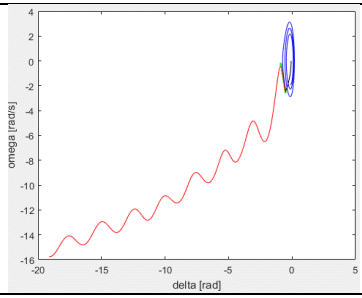
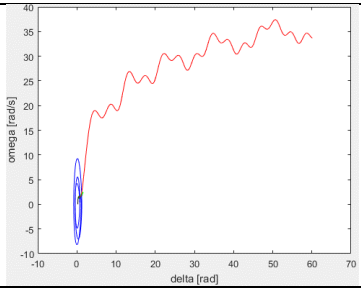
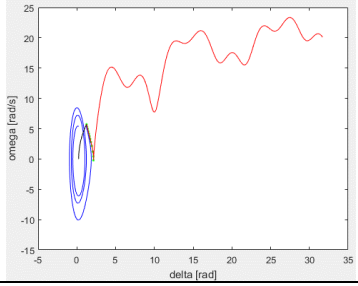
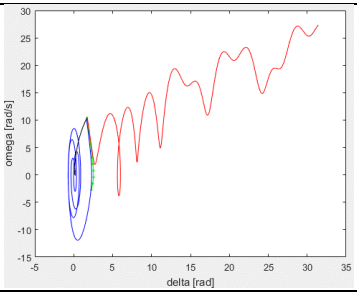
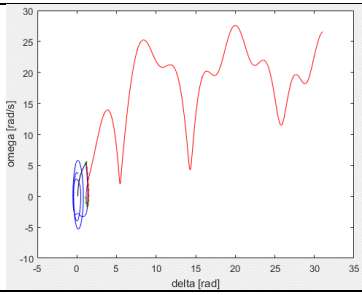


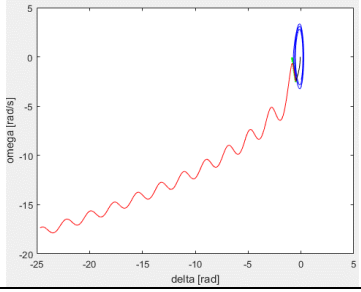
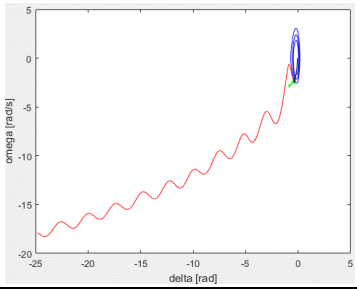
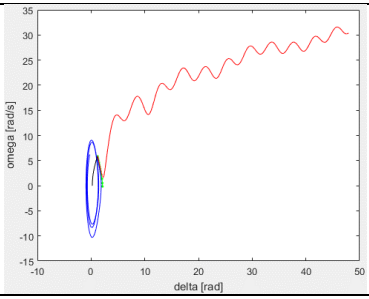
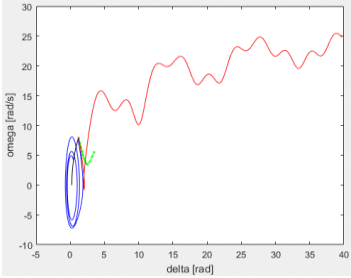
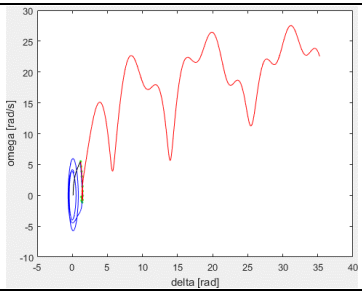
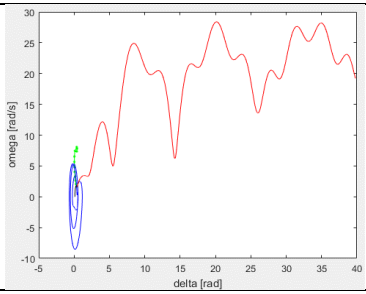
Generator 3

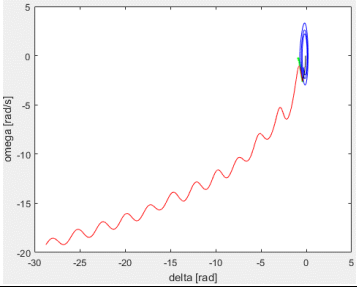
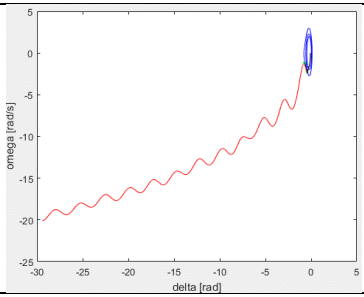
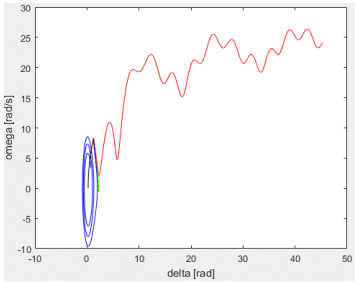
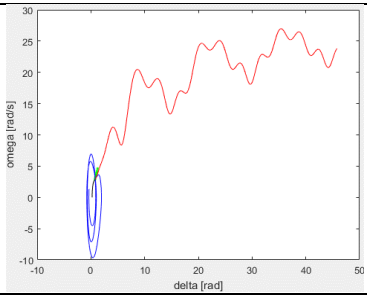
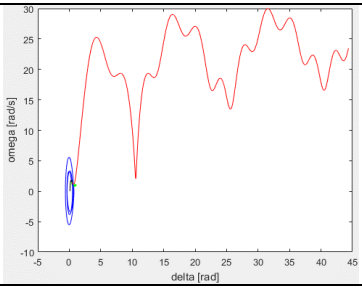
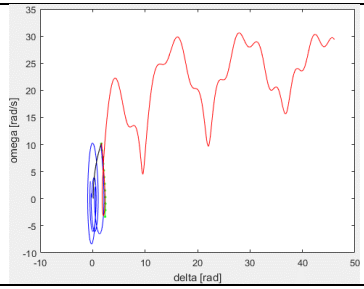


b. Grafik sistem dengan *Damping* 2%

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

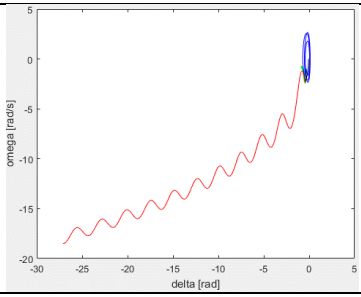
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

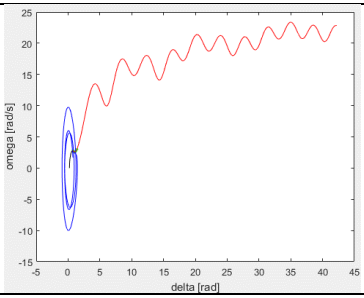
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

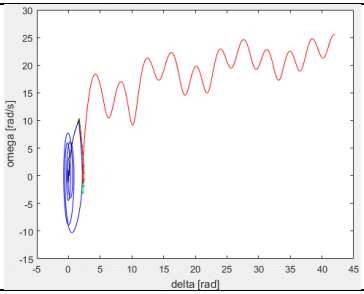
Generator 1



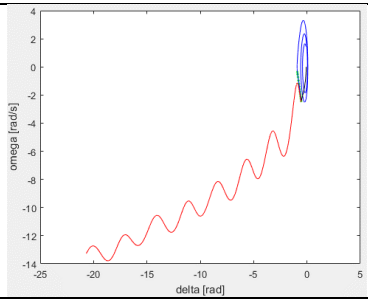
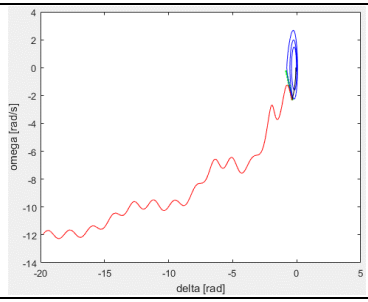
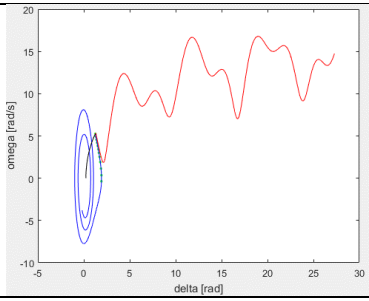
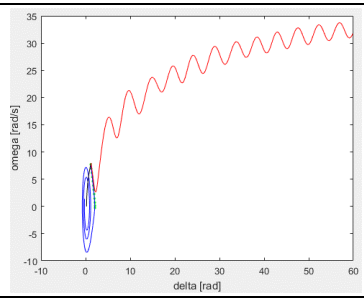
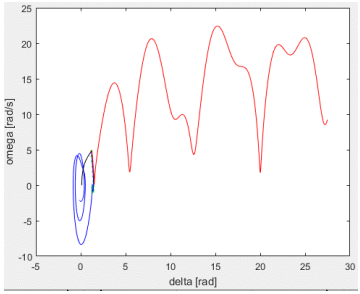
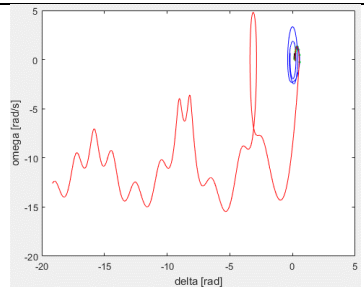
Generator 2

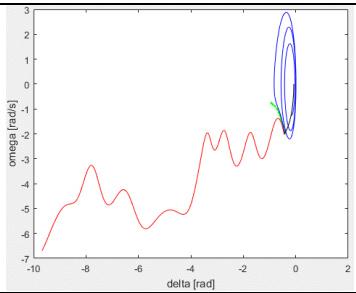
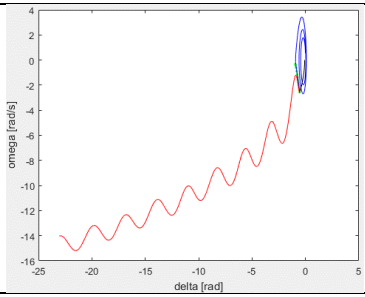
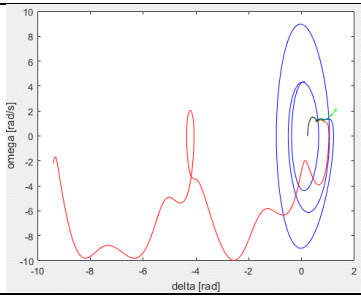
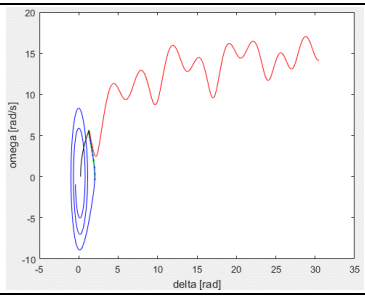
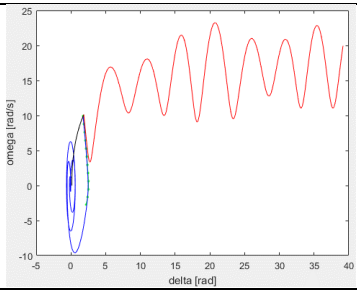
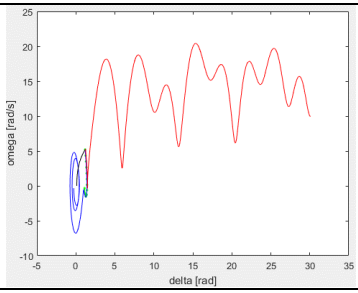


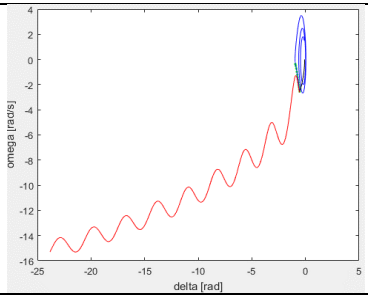
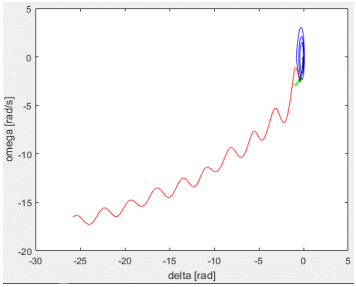
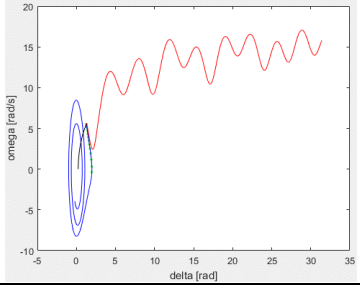
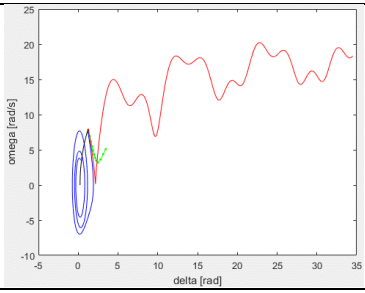
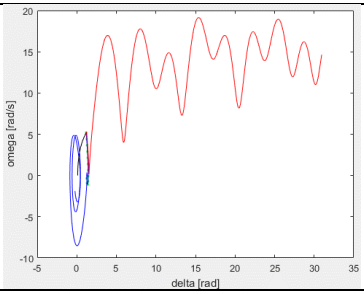
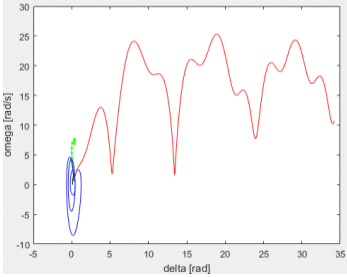
Generator 3

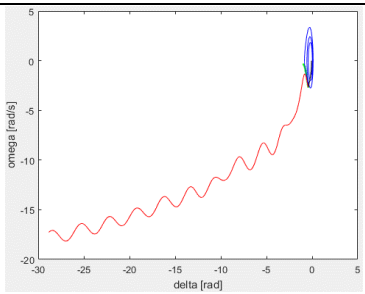
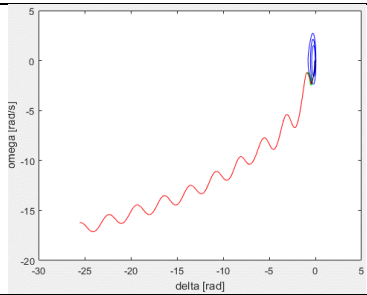
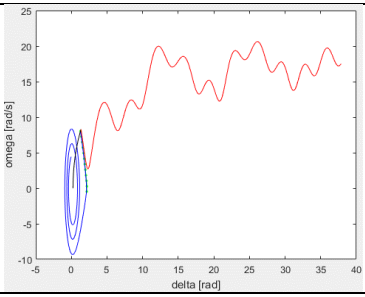
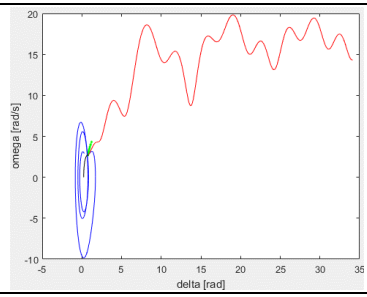
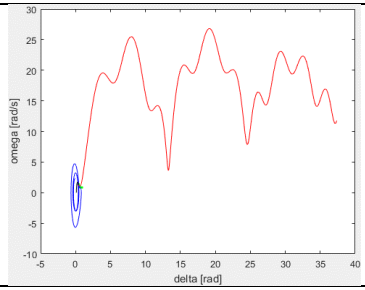
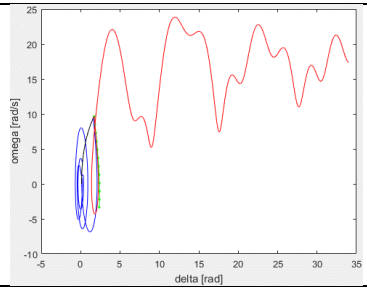


c. Grafik sistem dengan *Damping* 3%

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

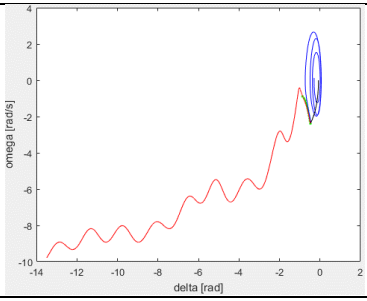
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

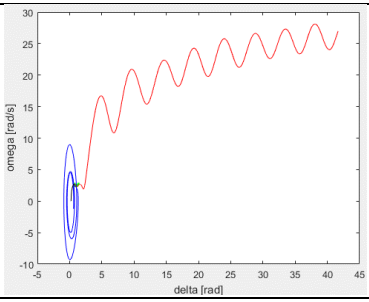
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

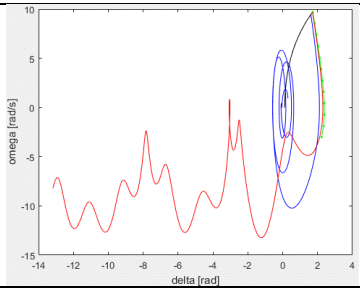
Generator 1



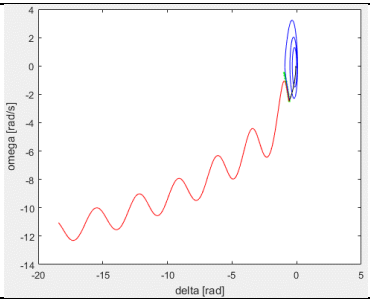
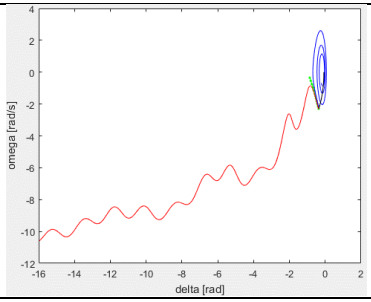
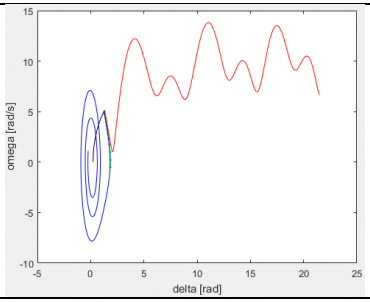
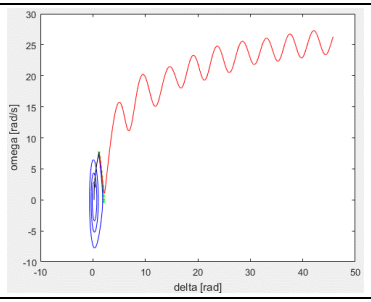
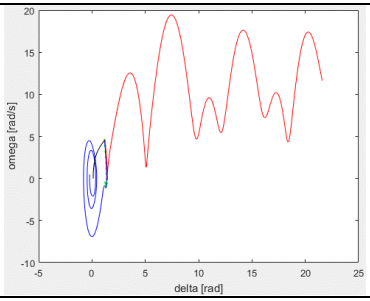
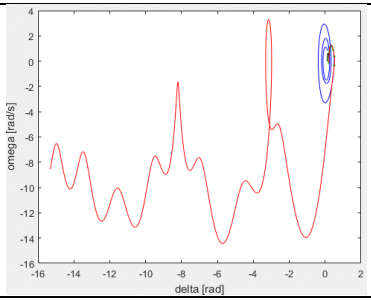
Generator 2

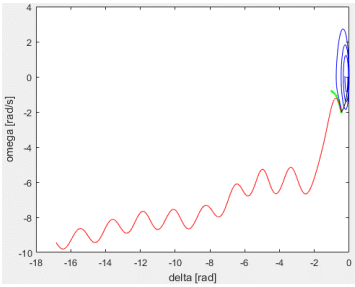
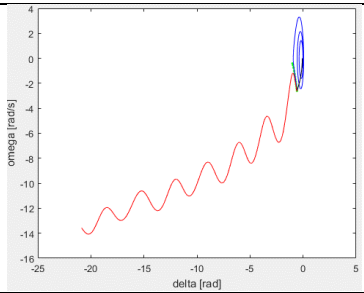
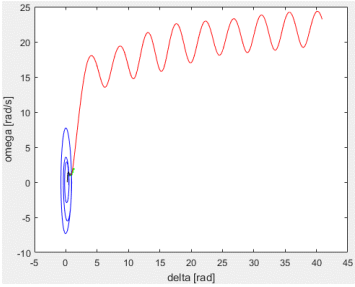
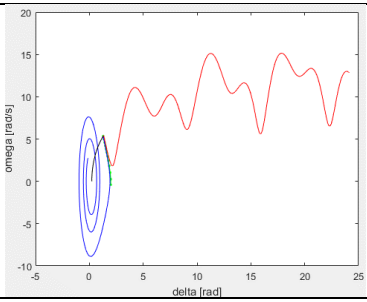
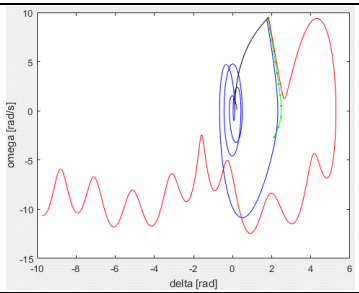
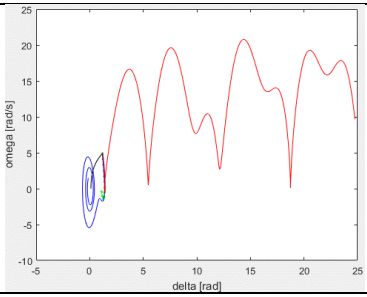


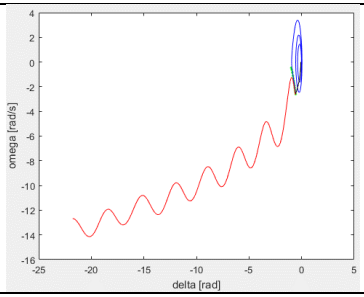
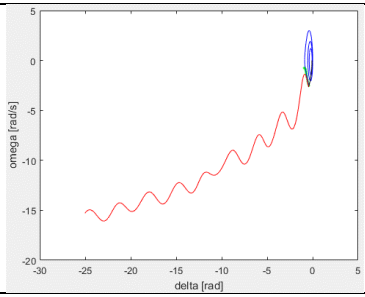
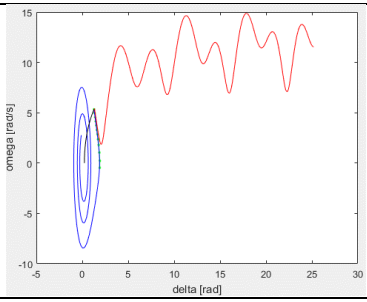
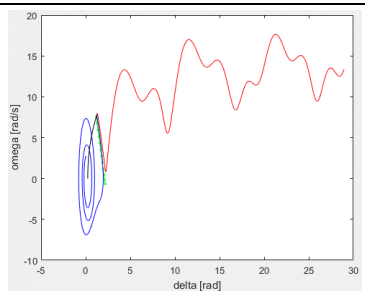
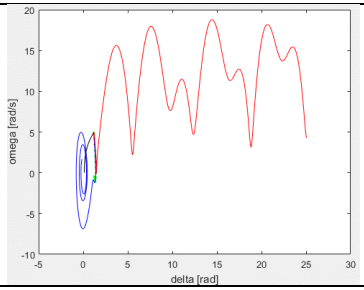
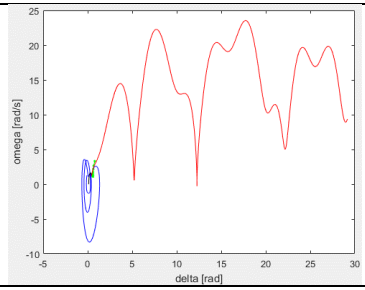
Generator 3

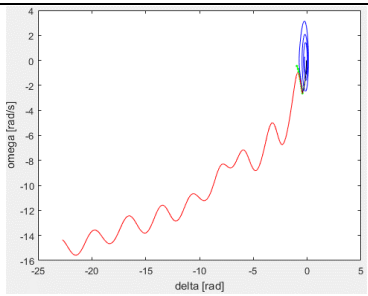
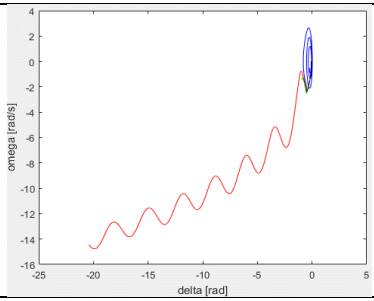
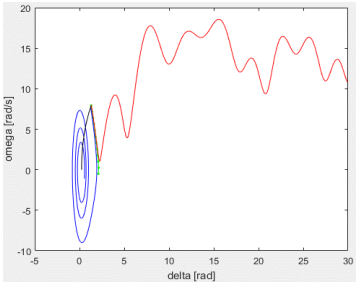
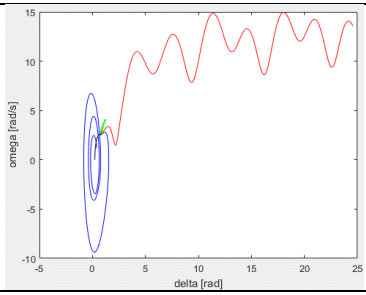
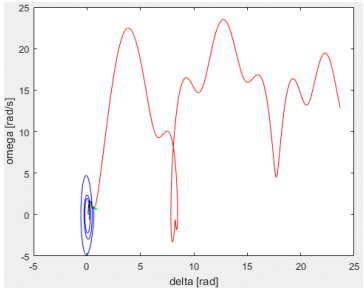
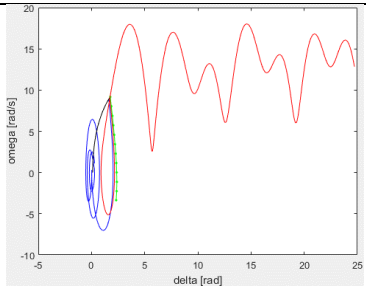


d. Grafik sistem dengan *Damping* 4%

E. Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

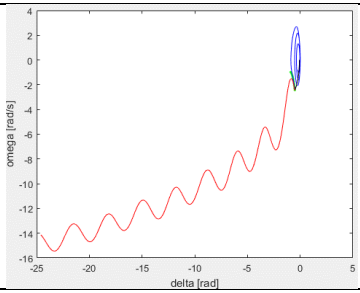
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

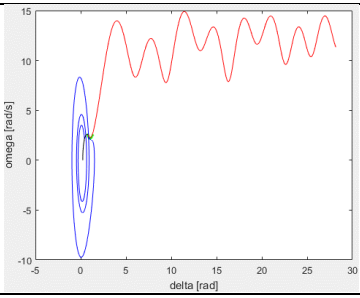
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

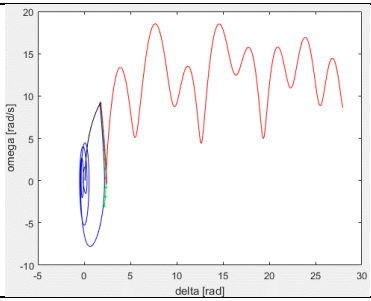
Generator 1



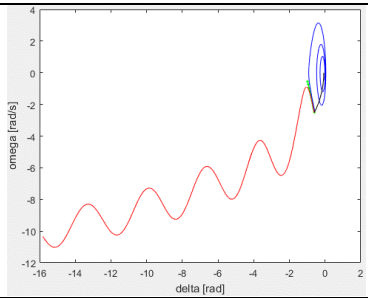
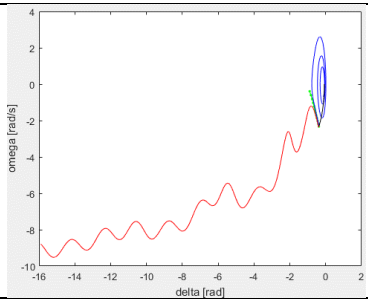
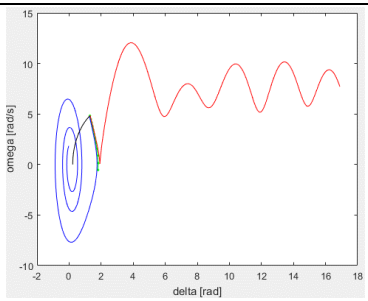
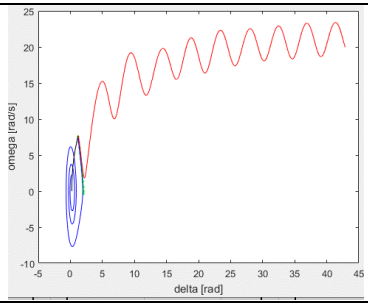
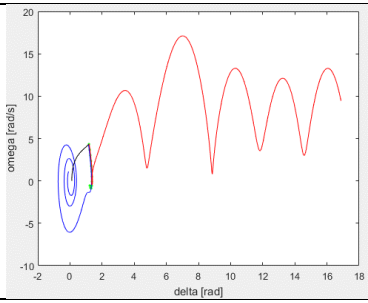
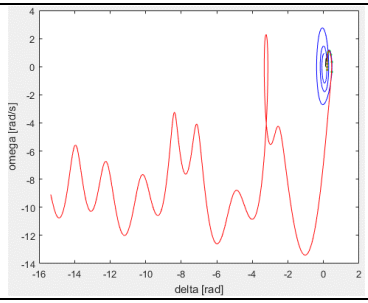
Generator 2

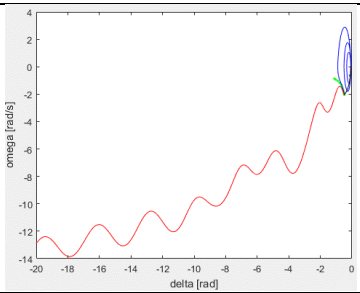
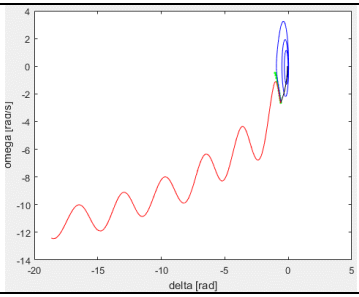
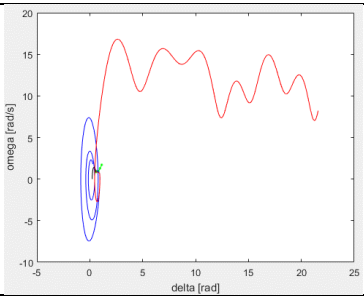
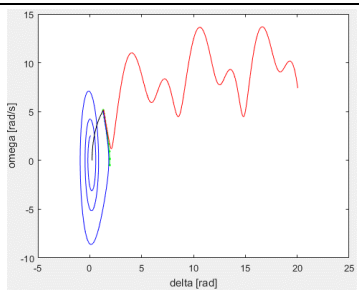
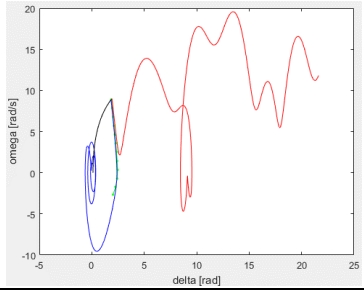
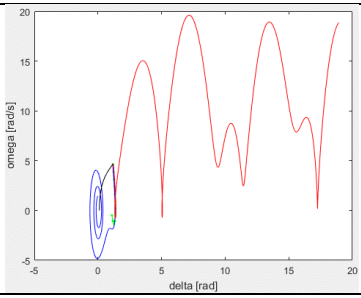


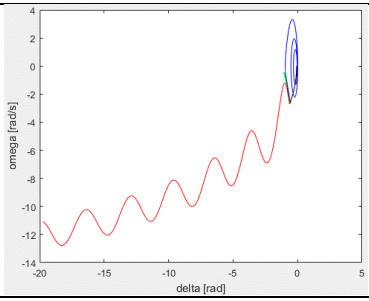
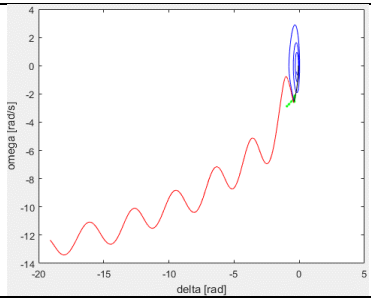
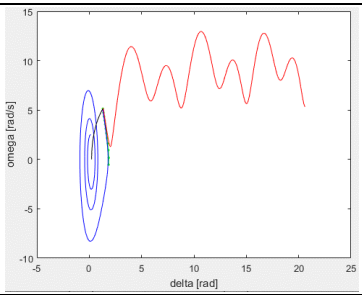
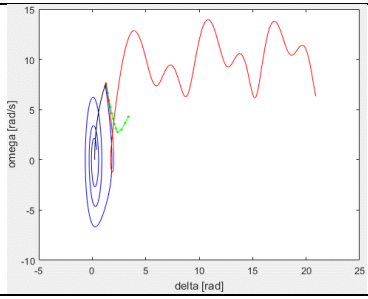
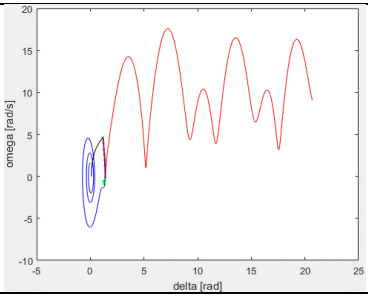
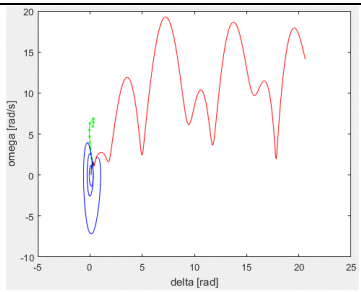
Generator 3

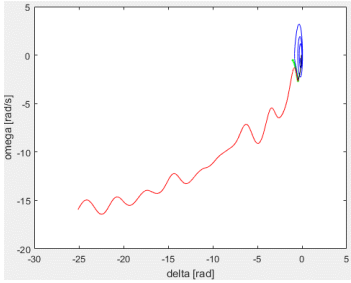
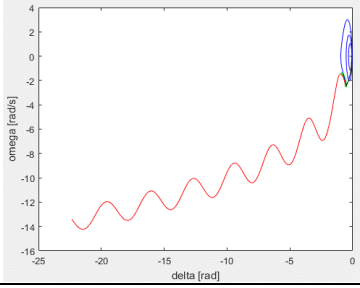
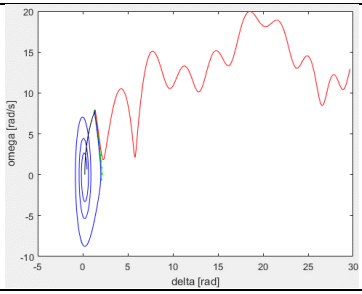
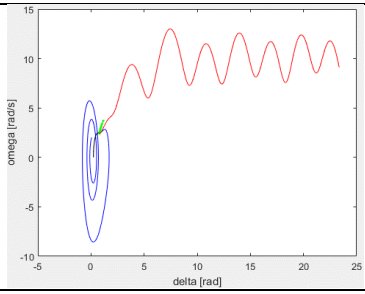
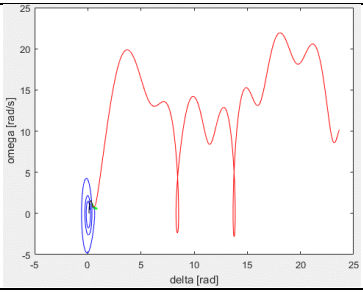
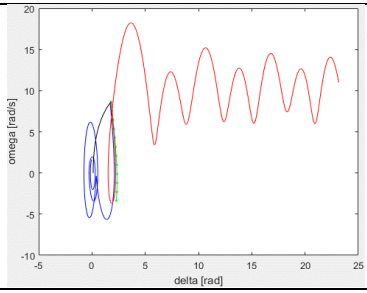


e. Grafik sistem dengan *Damping* 5%

Fault A	Fault B
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

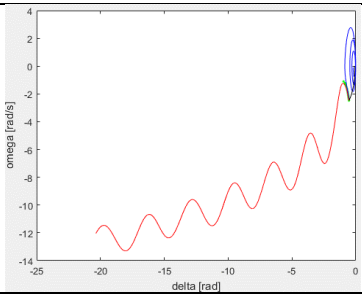
Fault C	Fault D
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault E	Fault F
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

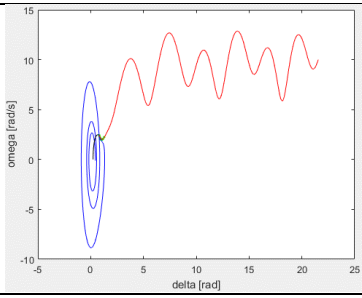
Fault G	Fault H
Generator 1	**Generator 1**
	
Generator 2	**Generator 2**
	
Generator 3	**Generator 3**
	

Fault I

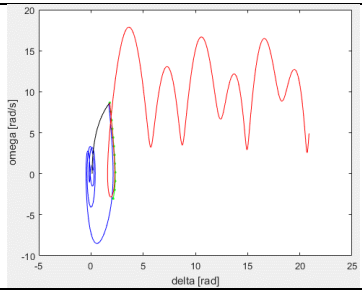
Generator 1



Generator 2



Generator 3



Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS

Risqiya Maulana, anak sulung dari dua bersaudara padangan Bapak Untung Djoko Susilo dan Ibu Hermina Setyowaty. Orang Surabaya asli, lahir di Surabaya pada 30 Juni 1998. Masa kecil sampai menempuh pendidikan jenjang sarjana di Surabaya. Mengawali pendidikan dasar di SD Negeri Kebraon II Surabaya, kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 6 Surabaya dan melanjutkan pendidikan jenjang sekolah menengah terakhir di SMA Negeri 5 Surabaya. Penulis melanjutkan pendidikan jenjang sarjana di Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan fokus bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Di kampus, penulis banyak mengikuti kegiatan seperti menjadi panitia di dalam Gerigi ITS 2017 dan ITS Expo 2017. Penulis juga aktif di organisasi BEM FTE periode 2018-2019 sebagai koordinator di Tim Event Evolty dan Staff UKM Basket ITS periode 2017-2018. Penulis terpilih menjadi asisten Laboratorium Instrrumntasi dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) sejak 2018, selain itu penulis juga pernah menjuarai lomba basket tingkat kampus mewakili Departemen Teknik Elektro seperti Maba Cup 2016 sebagai Juara II dan IBL 2K17 sebagai juara III. Penulis dapat dihubungi melalui alamat surel risqiyamaulana@gmail.com