



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**PENENTUAN LETAK *SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE (SCES)* BERDASARKAN METODE *CRITICAL TRAJECTORY* UNTUK MEMPERBAIKI NILAI *CRITICAL CLEARING TIME (CCT)***

Almira Atha Nurhasyimi  
NRP 07111540000030

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**PENENTUAN LETAK *SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE (SCES)* BERDASARKAN METODE *CRITICAL TRAJECTORY* UNTUK MEMPERBAIKI NILAI *CRITICAL CLEARING TIME (CCT)***

Almira Atha Nurhasyimi  
NRP 0711154000030

Dosen Pembimbing  
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - EE 184801**

**OBTAINING SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE  
(SCES) LOCATION BASED ON CRITICAL  
TRAJECTORY METHOD FOR IMPROVING CRITICAL  
CLEARING TIME (CCT)**

Almira Atha Nurhasyimi  
NRP 0711154000030

Supervisors

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc, Ph.D

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019



## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Penentuan Letak Supercapacitor Energy Storage (SCES) Berdasarkan Metode Critical Trajectory untuk Memperbaiki Nilai Critical Clearing Time (CCT)**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan 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, Mei 2019



Almira Atha Nurhasyimi  
0711154000030

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# **PENENTUAN LETAK SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE (SCES) BERDASARKAN METODE CRITICAL TRAJECTORY UNTUK MEMPERBAIKI NILAI CRITICAL CLEARING TIME (CCT)**

## **TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

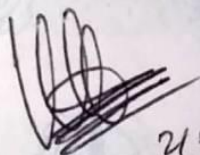
**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**



**Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng  
NIP. 197309271998031004**

**Dosen Pembimbing II**



**Vita Lystianingrum, ST., M.Sc, Ph.D  
NIP. 198208292006042001**



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **PENENTUAN LETAK *SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE* (SCES) BERDASARKAN METODE *CRITICAL TRAJECTORY* UNTUK MEMPERBAIKI NILAI *CRITICAL CLEARING TIME* (CCT)**

Nama Mahasiswa : Almira Atha Nurhasyimi  
Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng  
Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D

## **ABSTRAK**

Kestabilan sistem merupakan salah satu aspek penting yang harus diperhatikan guna menjaga kontinuitas dan reliabilitas sistem tenaga listrik. Ketika sistem mengalami gangguan besar, maka perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk memastikan bahwa sistem mampu mempertahankan sinkronisasinya pada kondisi transien. Agar sistem dapat stabil, gangguan harus segera dihilangkan dengan mempertimbangkan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT). Jika waktu pemutusan gangguan oleh sistem proteksi melebihi nilai CCT, maka sistem akan menjadi tidak stabil. Untuk meningkatkan jaminan kestabilan sistem, maka *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dipasang pada salah satu bus generator dalam sistem. Pada tugas akhir ini akan dilakukan pencarian bus generator yang tepat sebagai lokasi peletakan SCES. Pemilihan lokasi peletakan SCES terbaik dilakukan berdasarkan nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*. Lintasan kritis (*critical trajectory*) merupakan lintasan yang dimulai dari suatu titik pada lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*) hingga mencapai suatu titik kritis di mana sistem kehilangan sinkronisasi. Hasil simulasi menunjukkan bus generator 2 (bus 2) sebagai lokasi peletakan SCES terbaik untuk sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 4,97%. Sementara untuk sistem IEEE *7-machine 57-bus*, bus generator 5 (bus 8) dipilih sebagai lokasi peletakan SCES terbaik dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 4,27%.

**Kata kunci:** Kestabilan Transien, *Critical Clearing Time* (CCT), *Critical Trajectory*, *Supercapacitor Energy Storage* (SCES)

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# ***OBTAINING SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE (SCES) LOCATION BASED ON CRITICAL TRAJECTORY METHOD FOR IMPROVING CRITICAL CLEARING TIME (CCT)***

*Student Name* : Almira Atha Nurhasyimi  
*Supervisor I* : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng  
*Supervisor II* : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D

## ***ABSTRACT***

*System stability is an important aspect that should be observed to maintain the continuity and reliability of the electrical power system. When a large disturbance occurs in a system, transient stability studies are needed to conduct to ensure that the system can withstand the transient condition. The system will remain stable if the fault in a system is immediately removed by considering the Critical Clearing Time (CCT). If the protection equipment operates after the value of CCT, the system becomes unstable. In order to improve system stability, a Supercapacitor Energy Storage (SCES) installed on a generator bus. In this final project, a search for the right generator bus as the location for SCES placement will be carried out. The best location for SCES placement is selected based on the system CCT values obtained using the Critical Trajectory method. The critical trajectory is defined as the trajectory that starts from a point on a fault-on trajectory and reaches a critical point that satisfies a set of condition of losing synchronism. The simulation result shows generator bus number 2 as the best placement location of SCES for Fouad and Anderson 3-machine 9-bus system with an increase of the system's CCT average values of 4,97%. While for the IEEE 7-machine 57-bus system, generator bus number 5 chosen as the best placement location of SCES with an increase of the system's CCT average values of 4,27%.*

***Keywords:*** *Transient Stability, Critical Clearing Time (CCT), Critical Trajectory, Supercapacitor Energy Storage (SCES)*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Penentuan Letak Supercapacitor Energy Storage (SCES) Berdasarkan Metode Critical Trajectory untuk Memperbaiki Nilai Critical Clearing Time (CCT)”**. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, karena masih memberi kesempatan pada hamba-Nya yang satu ini untuk memperbaiki diri, menjadi hamba dan pribadi yang lebih baik.
2. Ibuk Ninik, Bapak Iwan, dan Dek Nisa yang tidak pernah berhenti berdoa dan mendukung penulis dalam kondisi apapun.
3. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng dan Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar membimbing dan memberikan banyak bantuan kepada penulis hingga akhirnya tugas akhir ini dapat selesai.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu.
5. Teman-teman e55 yang telah menemani selama perkuliahan.
6. Asisten LIPIST B-204 dengan segala cerita dan humornya.
7. Mas-mas, mbak Mila, mbak Nisa dan teman-teman Departemen Keporfesian dan Deapartemen Kesma Himatektro. Rek dan adek Departemen Prokesma Himatektro yang tidak penah mau makan di luar area kampus sekitarnya.
8. Grup Mbebek, Honey Star, Bengbeng, Intelek, dan grup-grup lainnya yang selama ini menjadi tempat berbagi.
9. Mbak Talitha selaku mentor dan kakak yang telah mendampingi penulis selama pengerjaan tuggas akhir ini.
10. Epril, Mbod, dan Raka (grup Bertransient) yang selama ini sudah berjuang bersama.
11. dan pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas cerita, ilmu, bantuan, dan doa yang telah diberikan selama ini. Terima kasih sebanyak-banyaknya.

Penulis telah berusaha secara maksimal untuk menyelesaikan tugas akhir ini, namun hal tersebut tidak menutup adanya kekurangan atau kesalahan. Oleh karena itu penulis dengan senang hati menerima kritik maupun saran untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi siapapun yang membacanya.

Surabaya, Mei 2019

Penulis,  
Almira Atha Nurhasyimi  
0711154000030



# DAFTAR ISI

<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR</b>	Error! Bookmark not defined.
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	Error! Bookmark not defined.
<b>ABSTRAK</b>	v
<b>ABSTRACT</b>	vii
<b>KATA PENGANTAR</b>	ix
<b>DAFTAR ISI</b>	xi
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xiv
<b>DAFTAR TABEL</b>	xvi
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi	3
1.5 Sistematika Penulisan	4
1.6 Relevansi	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI</b>	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Dasar Teori	8
2.2.1 Kestabilan Sistem	8
2.2.2 Klasifikasi Kestabilan	8
2.2.3 Kestabilan Transien	10
2.2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	11
2.2.5 <i>Critical Clearing Time (CCT)</i>	14
2.2.6 <i>Supercapacitor Energy Storage (SCES)</i>	15
<b>BAB 3 PEMODELAN SISTEM</b>	17
3.1 Persiapan Data Awal	17
3.1.1 Data Sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i>	17
3.1.2 Data Sistem IEEE <i>7-machine 57-bus</i>	20
3.2 Perhitungan Nilai <i>Critical Clearing Time (CCT)</i> Menggunakan Metode <i>Critical Trajectory</i> Berdasarkan <i>Modified Losing Synchronism</i>	27
3.2.1 <i>Power Flow</i>	27
3.2.2 Reduksi Matriks	30

3.2.3	Perhitungan Tegangan Internal .....	31
3.2.4	Pemodelan Sistem.....	32
3.2.5	Perumusan Masalah .....	32
3.2.6	Metode Runge-Kutta.....	34
3.2.7	Metode Modifikasi Persamaan Trapezoidal .....	35
3.2.8	Perumusan Minimalisasi.....	37
3.3	Modifikasi Sitem dengan Penambahan <i>Supercapacitor Energy Storage</i> (SCES).....	38
3.4	Metodologi Pengerjaan .....	38
<b>BAB 4</b>	<b>SIMULASI DAN ANALISIS .....</b>	<b>42</b>
4.1	Analisa Nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> .....	43
4.1.1	Analisa Nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> tanpa <i>Supercapacitor Energy Storage</i> (SCES).....	43
4.1.2	Analisa Nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> dengan <i>Supercapacitor Energy Storage</i> (SCES).....	46
4.1.3	Penentuan Lokasi Peletakan <i>Supercapacitor Energy Storage</i> (SCES) dalam Sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> .. .....	55
4.2	Analisa Nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada Sistem IEEE <i>7-machine 57-bus</i> .....	57
4.2.1	Analisa Nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada sistem IEEE <i>7-machine 57-bus</i> tanpa <i>Supercapacitor Energy Storage</i> (SCES).....	57
4.2.2	Analisa Nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada Sistem IEEE <i>7-machine 57-bus</i> dengan <i>Supercapacitor Energy Storage</i> (SCES).....	60
4.2.3	Penentuan Lokasi Peletakan <i>Supercapacitor Energy Storage</i> (SCES) dalam Sistem IEEE <i>7-machine 57-bus</i> .....	89
<b>BAB 5</b>	<b>PENUTUP .....</b>	<b>91</b>
5.1	Kesimpulan .....	91
5.2	Saran .....	91
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		<b>93</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS</b> .....		<b>95</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Klasifikasi kestabilan sistem tenaga. ....	9
<b>Gambar 2. 2</b>	Respons sudut rotor terhadap gangguan. ....	11
<b>Gambar 2. 3</b>	Lintasan untuk sistem <i>single machine</i> yang terhubung dengan <i>infinite bus</i> tanpa <i>damping</i> . ....	14
<b>Gambar 3. 1</b>	<i>Single Line Diagram</i> sistem Fouad dan Anderson 3- <i>machine 9-bus</i> dengan 9 titik lokasi gangguan. ....	18
<b>Gambar 3. 2</b>	<i>Single Line Diagram</i> sistem IEEE 7- <i>machine 57-bus</i> dengan 10 titik lokasi gangguan. ....	20
<b>Gambar 3. 3</b>	Pemodelan generator. ....	31
<b>Gambar 3. 4</b>	Modifikasi Trapezoidal ....	36
<b>Gambar 3. 5</b>	Diagram alir untuk memperoleh nilai CCT sistem tanpa SCES. ....	40
<b>Gambar 3. 6</b>	Diagram alir untuk memperoleh nilai CCT sistem dengan SCES. ....	41

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Data saluran transmisi sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> .....	18
<b>Tabel 3. 2</b> Data bus sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> .....	19
<b>Tabel 3. 3</b> Data saluran transmisi sistem IEEE <i>7-machine 57-bus</i> .....	21
<b>Tabel 3. 4</b> Data bus sistem IEEE <i>7-machine 57-bus</i> .....	25
<b>Tabel 4. 1</b> Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> tanpa SCES. ....	44
<b>Tabel 4. 2</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> tanpa SCES saat terjadi gangguan di titik A. ....	45
<b>Tabel 4. 3</b> Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> dengan SCES pada bus generator 1. ....	47
<b>Tabel 4. 4</b> Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 1. ....	48
<b>Tabel 4. 5</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> dengan SCES pada bus generator 1 saat terjadi gangguan di titik A. ....	49
<b>Tabel 4. 6</b> Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> dengan SCES pada bus generator 2. ....	50
<b>Tabel 4. 7</b> Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 2. ....	51
<b>Tabel 4. 8</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> dengan SCES pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik A. ....	52
<b>Tabel 4. 9</b> Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> dengan SCES pada bus generator 3. ....	53
<b>Tabel 4. 10</b> Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 3. ....	54
<b>Tabel 4. 11</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> dengan SCES pada bus generator 3 saat terjadi gangguan di titik A. ....	55
<b>Tabel 4. 12</b> Rata-rata nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson <i>3-machine 9-bus</i> tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator.....	56

<b>Tabel 4. 13</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES. .....	58
<b>Tabel 4. 14</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES saat terjadi gangguan di titik F.....	59
<b>Tabel 4. 15</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 1.....	61
<b>Tabel 4. 16</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 1.....	62
<b>Tabel 4. 17</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 1 saat terjadi gangguan di titik F.....	64
<b>Tabel 4. 18</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 2.....	66
<b>Tabel 4. 19</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 2.....	67
<b>Tabel 4. 20</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik F.....	68
<b>Tabel 4. 21</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 3.....	70
<b>Tabel 4. 22</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 3.....	71
<b>Tabel 4. 23</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 3 saat terjadi gangguan di titik F.....	72
<b>Tabel 4. 24</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 4.....	74
<b>Tabel 4. 25</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 4.....	74
<b>Tabel 4. 26</b> Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 4 saat terjadi gangguan di titik F.....	76
<b>Tabel 4. 27</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 5.....	78
<b>Tabel 4. 28</b> Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 5.....	78

<b>Tabel 4. 29</b>	Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 5 saat terjadi gangguan di titik F. ....	80
<b>Tabel 4. 30</b>	Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 6. ....	82
<b>Tabel 4. 31</b>	Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 6. ....	83
<b>Tabel 4. 32</b>	Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 6 saat terjadi gangguan di titik F. ....	84
<b>Tabel 4. 33</b>	Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 7. ....	86
<b>Tabel 4. 34</b>	Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 7. ....	86
<b>Tabel 4. 35</b>	Grafik karakteristik $\omega$ (rad/s) terhadap $\delta$ (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 7 saat terjadi gangguan di titik F. ....	88
<b>Tabel 4. 36</b>	Rata-rata nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator. ....	90



*Halaman ini sengaja dikosongkan*



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Stabilitas sistem menjadi salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan guna menjaga kontinuitas dan reliabilitas sistem tenaga listrik. Secara umum, kestabilan sistem merupakan kemampuan suatu sistem tenaga dalam mempertahankan dan mendapatkan kembali kondisi operasi setimbangnya setelah mengalami gangguan, baik gangguan kecil maupun gangguan besar. Ketika sistem mengalami gangguan besar, misalnya hubung singkat pada saluran transmisi atau lepasnya generator besar dari sistem, maka perlu dilakukan studi kestabilan transien. Tujuan utama dari studi kestabilan transien adalah untuk memastikan bahwa sistem dapat mempertahankan sinkronisasinya pada kondisi transien setelah terjadinya gangguan besar secara tiba-tiba [1].

Gangguan yang terjadi dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara daya input mekanik dari *prime mover* dan daya *output* elektrik pada sistem. Rotor mesin sinkron yang awalnya berputar pada kecepatan konstan, kemudian mengalami percepatan atau perlambatan putaran. Apabila kondisi ini terus terjadi, maka sistem terancam kehilangan sinkronisasi dan menjadi tidak stabil. Agar sistem dapat stabil, gangguan harus segera dihilangkan dengan mempertimbangkan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT). Sistem proteksi yang digunakan harus mampu memutus gangguan sebelum nilai CCT. Jika gangguan diputus melebihi waktu kritisnya, maka sistem menjadi tidak stabil.

Mengacu pada referensi [2], metode yang digunakan untuk memperoleh nilai CCT sistem berdasarkan perhitungan lintasan pada batas kestabilan yang kemudian disebut sebagai *critical trajectory* atau lintasan kritis. *Critical trajectory* merupakan lintasan yang dimulai dari suatu titik pada lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*) hingga mencapai suatu titik kritis di mana sistem kehilangan sinkronisasi. Kelebihan dari metode ini ialah mampu mendapatkan nilai CCT yang tepat secara langsung.

Di sisi lain, untuk meningkatkan jaminan kestabilan sistem, maka *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) ditambahkan dalam sistem [3]. SCES merupakan perangkat penyimpan daya yang mampu menyimpan dan melepaskan daya listrik ke sistem secara cepat dengan jumlah yang

besar. Dalam sistem, SCES dipasang pada bus generator untuk membantu meredam osilasi yang terjadi saat sistem mengalami gangguan.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan pencarian lokasi peletakan SCES yang tepat dalam sistem, yaitu bus generator yang menghasilkan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem terbesar ketika dipasang SCES.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini adalah menemukan bus generator yang tepat untuk meletakkan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dalam sistem. Hal ini bertujuan untuk memperoleh nilai CCT sistem yang optimal sehingga dapat meningkatkan kestabilan sistem ketika terjadi gangguan.

Diasumsikan bahwa setiap saluran transmisi terdiri atas saluran ganda dan terjadi gangguan tiga fasa (seimbang) pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Gangguan tersebut kemudian ditangani dengan membuka saluran yang mengalami gangguan. Bus generator terbaik dipilih berdasarkan peningkatan nilai rata-rata *Critical Clearing Time* (CCT) sistem terbesar setelah pemasangan SCES pada bus generator tersebut.

Sebagai batasan masalah, simulasi dilakukan pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan sistem IEEE *7-machine 57-bus* tanpa *damping*. Nilai CCT sistem diperoleh dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*. Selain itu, tugas akhir ini tidak melakukan pemodelan SCES (*controller, state of charging-discharging*) dan diasumsikan bahwa SCES pada sistem selalu berada dalam kondisi kosong sehingga dapat langsung bekerja saat terjadi gangguan. SCES dalam tugas akhir ini hanya bekerja dengan cara menyerap (*absorb*) daya dan tidak ada daya keluar yang disuplai oleh SCES. Kapasitas SCES yang digunakan telah ditentukan sebelumnya dan dipasang pada salah satu bus generator dalam sistem.

## 1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah menentukan bus generator terbaik untuk meletakkan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) guna meningkatkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem sekaligus meningkatkan jaminan kestabilan transien sistem setelah mengalami gangguan.

## 1.4 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur  
Untuk menunjang pengerjaan tugas akhir ini, dilakukan studi literatur melalui berbagai literasi berupa *paper*, jurnal, buku, dan media lainnya yang membahas tentang kestabilan transien, penentuan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) menggunakan metode *Critical Trajectory* berdasarkan *Modified Losing Synchronims*, pengaruh pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada nilai CCT sistem, serta referensi terkait lainnya.
2. Pengumpulan Data  
Pada tahap ini dilakukan pengumpulan data saluran dan data tiap bus untuk sistem sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan sistem IEEE *7-machine 57-bus*.
3. Perancangan dan Pemodelan Sistem  
Untuk mendapatkan rancangan program yang sesuai guna menemukan bus generator yang tepat sebagai lokasi peletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES), maka dibuat suatu diagram alir. Selain itu, dilakukan pemodelan sistem dengan memasukkan data-data serta formulasi perhitungan terkait. Sistem dimodelkan dalam dua kondisi, yaitu sistem saat belum terpasang SCES dan sistem dengan SCES yang telah terpasang pada salah satu bus generator.
4. Simulasi  
Simulasi untuk menentukan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem dilakukan pada dua kondisi, yaitu sistem tanpa SCES dan sistem dengan SCES. Untuk sistem dengan SCES, simulasi dilakukan dengan memasang SCES pada salah satu bus generator dalam sistem secara bergantian sehingga diperoleh nilai CCT sistem untuk setiap *case* peletakan SCES.
5. Analisa Data  
Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem yang dihasilkan dari simulasi untuk setiap *case* peletakan SCES kemudian dianalisa. Bus generator terbaik untuk meletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dipilih berdasarkan peningkatan nilai rata-rata

CCT sistem terbesar setelah dilakukan pemasangan SCES pada bus generator tertentu.

6. Pembuatan Kesimpulan dan Penulisan Buku Tugas Akhir

Setelah semua tahap selesai dilaksanakan, maka dilakukan pembuatan kesimpulan berdasarkan analisa data yang diperoleh melalui tahap simulasi. Sebagai hasil akhir, laporan ditulis dalam bentuk buku tugas akhir.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab I : PENDAHULUAN

Bab I secara garis besar menjelaskan hal-hal yang berkaitan dengan pemilihan judul tugas akhir yang meliputi latar belakang permasalahan, perumusan masalah, tujuan, metodologi penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi dari pengerjaan tugas akhir.

Bab II : TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab II secara garis besar terdiri atas tinjauan pustaka dan berbagai teori penunjang yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir. Kajian pustaka menjelaskan penelitian-penelitian sebelumnya yang terkait. Sementara dasar teori berisi pengertian kestabilan sistem secara umum, klasifikasi kestabilan, kestabilan transien, dinamika rotor dan persamaan ayunan, *Critical Clearing Time* (CCT), metode *Critical Trajectory*, serta *Supercapacitor Energy Storage* (SCES).

Bab III : PEMODELAN SISTEM

Bab III secara garis besar menjelaskan langkah-langkah untuk memperoleh nilai *Critical Clearing Time* (CCT) menggunakan metode *Critical Trajectory* serta dilakukan modifikasi pada sistem dengan penambahan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES). Selain itu, dalam bab III juga diberikan data-data pendukung dari sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan sistem IEEE *7-machine 57-bus* beserta titik-titik lokasi terjadinya gangguan.

#### Bab IV : SIMULASI DAN ANALISIS

Bab IV secara garis besar berisi hasil simulasi yang berupa nilai *Critical Clearing Time* (CCT) untuk sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan sistem IEEE *7-machine 57-bus*. Hasil simulasi yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui lokasi peletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) yang terbaik dalam sistem.

#### Bab V : PENUTUP

Bab V secara garis besar berisi kesimpulan dari keseluruhan tahapan dalam penelitian dan juga saran yang dapat digunakan sebagai masukan untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan topik tugas akhir ini.

### 1.6 Relevansi

Hasil dari tugas akhir ini diharapkan dapat membantu meningkatkan jaminan kestabilan suatu sistem *multi-machine* dengan adanya kenaikan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem setelah dilakukan pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada bus generator yang tepat. Selain itu, tugas akhir ini dapat pula digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan topik yang dibahas dalam tugas akhir ini.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Bab ini terdiri atas tinjauan pustaka yang berisi rangkuman penelitian terkait dan dasar teori yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini.

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

Berdasarkan referensi [3], pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dalam sistem dapat meningkatkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem dengan rata-rata sebesar 0,0143 detik. Untuk memperoleh nilai CCT digunakan metode *Critical Trajectory* berdasarkan *Modified Losing Synchronism*.

Sementara pada referensi [4], parameter dari *Capacitor Energy Storage* (CES) yang dipasang dalam sistem dioptimasi menggunakan metode *Differential Evolution Algorithm* (DEA) guna memperoleh nilai CCT yang optimal. Nilai CCT didapatkan melalui metode *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP). Berdasarkan hasil simulasi pada referensi [4], pemasangan CES beserta optimasi parameter CES yang dilakukan dapat meningkatkan nilai CCT. Kenaikan nilai CCT akan memperpanjang waktu operasi yang diizinkan dari suatu sistem proteksi dalam mengisolasi gangguan yang terjadi sehingga meningkatkan jaminan kestabilan sistem.

Namun di sisi lain, pemasangan *energy storage* pada referensi [3] dan referensi [4] hanya dilakukan untuk satu lokasi peletakan dalam sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*. Sebagai upaya untuk mendapatkan nilai CCT sistem yang optimal setelah penambahan SCES, maka dalam tugas akhir ini perangkat SCES akan dipasang pada salah satu bus generator secara bergantian sehingga diperoleh data CCT sistem dari setiap *case* peletakan SCES. Sistem yang digunakan adalah sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan sistem IEEE *7-machines 57-bus*.

Dari data tersebut kemudian digunakan untuk menentukan lokasi peletakan SCES yang tepat dalam sistem. Pemilihan bus generator terbaik untuk meletakkan SCES dilakukan berdasarkan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem terbesar setelah pemasangan SCES pada bus generator tersebut.

## 2.2 Dasar Teori

Dasar teori yang dibahas meliputi teori kestabilan sistem secara umum, klasifikasi kestabilan, kestabilan transien, dinamika rotor dan persamaan ayunan, *Critical Clearing Time (CCT)*, metode *Critical Trajectory*, serta *Supercapacitor Energy Storage (SCES)*.

### 2.2.1 Kestabilan Sistem

Sistem tenaga listrik beroperasi pada suatu kondisi yang tidak linier dengan beban, daya generator, maupun parameter-parameter lainnya selalu mengalami perubahan. Untuk menjaga kontinuitas dan reliabilitas sistem, maka kestabilan sistem perlu diperhatikan. Berdasarkan definisinya, kestabilan sistem tenaga adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik, dengan kondisi operasi awal tertentu, untuk mendapatkan kembali kondisi operasi setimbangnya setelah mengalami gangguan [5]. Ketika terjadi gangguan, stabilitas sistem akan bergantung pada kondisi awal sistem dan sifat dari gangguan.

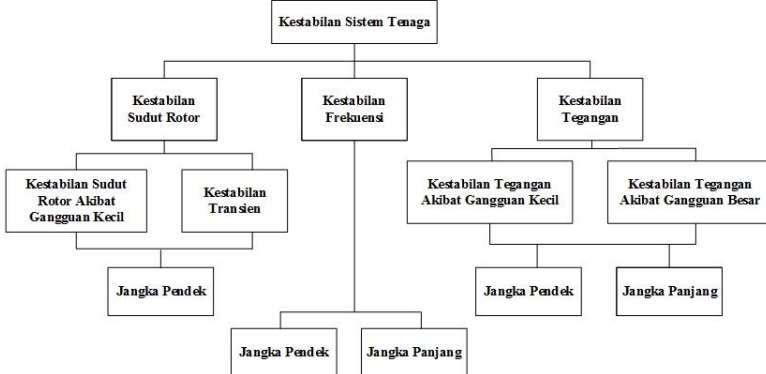
Berbagai macam gangguan mungkin terjadi pada suatu sistem tenaga, baik gangguan kecil hingga gangguan besar. Gangguan kecil (*small disturbance*) misalnya berupa perubahan beban secara terus-menerus. Sistem tenaga harus mampu menyesuaikan perubahan kondisi tersebut dan dapat tetap bekerja dengan baik. Gangguan besar (*large disturbance*) misalnya berupa gangguan hubung singkat pada jaringan transmisi dan lepasnya generator dari sistem. Terjadinya gangguan besar dapat mengakibatkan perubahan secara struktural pada sistem akibat pemutusan pada bagian yang mengalami gangguan guna mencegah dampak yang lebih luas.

Sistem tenaga dikatakan stabil apabila setelah terjadinya gangguan, sistem mampu mencapai suatu kondisi operasi setimbang yang baru. Sementara itu, sistem yang tidak stabil dapat menyebabkan terjadinya *blackout* jika tidak dilakukan tindakan penanganan dengan cepat dan tepat.

### 2.2.2 Klasifikasi Kestabilan

Suatu sistem tenaga listrik mungkin dapat tetap stabil ketika mengalami gangguan tertentu, namun sistem justru tidak stabil saat terjadi gangguan lainnya. Terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan suatu sistem tenaga. Untuk memudahkan dalam menganalisa

permasalahan kestabilan sistem, maka kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi beberapa bentuk [5], antara lain:



**Gambar 2. 1** Klasifikasi kestabilan sistem tenaga.

### 2.2.2.1 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan nilai tegangan semua bus dalam sistem agar tetap stabil pada nilai yang dapat diterima (sesuai standar), baik saat kondisi operasi normal maupun setelah terjadinya gangguan. Ketika sistem mengalami gangguan, peningkatan kebutuhan beban, atau perubahan kondisi sistem yang menyebabkan penurunan tegangan secara tidak terkontrol, maka hal tersebut menunjukkan terjadinya ketidakstabilan tegangan pada sistem. Kestabilan tegangan bergantung pada kemampuan sistem untuk menjaga atau mengembalikan keseimbangan antara kebutuhan beban dan suplai dari pembangkitan.

### 2.2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi berkaitan dengan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi sistem agar tetap stabil setelah terjadinya gangguan besar yang mengakibatkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini bergantung pada kemampuan sistem untuk menjaga atau mengembalikan keseimbangan antara sistem pembangkitan dan beban dengan beban yang hilang dari sistem minimum.

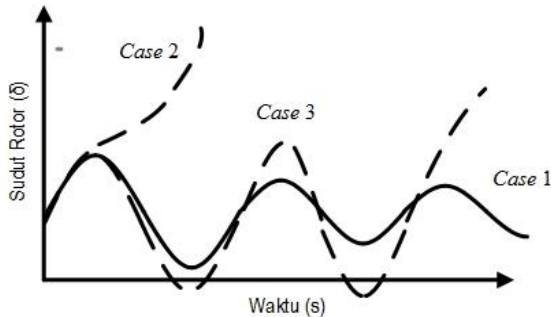
### **2.2.2.3 Kestabilan Sudut Rotor**

Kestabilan sudut rotor berkaitan dengan kemampuan dari mesin-mesin sinkron yang terinterkoneksi dalam suatu sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya setelah terjadinya gangguan. Kestabilan sudut rotor bergantung pada kemampuan sistem untuk mempertahankan atau mengembalikan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik dari masing-masing mesin sinkron.

Pada kondisi *steady state*, masing-masing generator memiliki torsi mekanik yang besarnya seimbang dengan torsi elektrik sehingga rotor generator berputar pada kecepatan yang konstan. Ketika terjadi gangguan, maka keseimbangan dari kedua parameter tersebut akan terganggu. Jika torsi mekanik lebih besar dibanding torsi elektrik, maka generator akan mengalami percepatan putaran rotor. Sebaliknya, jika torsi elektrik lebih besar dibanding torsi mekanik, maka putaran rotor generator akan mengalami perlambatan. Terjadinya percepatan atau perlambatan pada putaran rotor menimbulkan adanya perbedaan sudut rotor. Di atas batas tertentu, peningkatan perbedaan sudut rotor disertai pula dengan berkurangnya transfer daya. Hal tersebut justru membuat perbedaan sudut rotor semakin jauh dan mengarah pada ketidakstabilan.

### **2.2.3 Kestabilan Transien**

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya ketika sistem mengalami gangguan besar. Respons sistem yang dihasilkan berupa penyimpangan yang besar dari sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh hubungan *power-angle* yang tidak linier. Jika perbedaan sudut dari mesin-mesin sinkron yang terinterkoneksi dalam sistem tetap berada dalam batas tertentu, maka sistem akan tetap sinkron. Ketidakstabilan sistem yang terjadi akan menyebabkan hilangnya sinkronisasi.



**Gambar 2. 2** Respons sudut rotor terhadap gangguan.

Gambar 2.2 menunjukkan perilaku mesin sinkron untuk kondisi stabil dan tidak stabil, di mana:

a) *Case 1*

Sudut rotor meningkat hingga nilai maksimum kemudian mengalami penurunan dan beresilasi hingga mencapai kondisi *steady state*.

b) *Case 2*

Sudut rotor terus meningkat hingga sistem kehilangan sinkronisasi. Kondisi ini disebut dengan *first-swing instability*.

c) *Case 3*

Sistem stabil pada ayunan pertama, namun sistem menjadi tidak stabil karena osilasi yang semakin meningkat saat mencapai kondisi akhir.

Untuk sistem berskala besar, ketidakstabilan transien tidak selalu terjadi pada *first-swing instability*. Umumnya, periode waktu dilakukannya studi kestabilan transien terbatas pada 3 hingga 5 detik setelah terjadinya gangguan. Namun periode tersebut dapat diperpanjang hingga 10 detik untuk sistem yang sangat besar.

#### 2.2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan [6]

Berdasarkan hukum kedua Newton untuk gerak rotasi, gerakan rotor pada suatu generator sinkron tiga fasa dapat dituliskan dalam persamaan berikut

$$J \alpha_m(t) = T_a(t) = T_m(t) - T_e(t) \quad (2. 1)$$

Keterangan:

$J$  = total momen inersia suatu massa yang berputar ( $kg\ m^2$ )

$\alpha_m$  = percepatan sudut rotor ( $rad/s^2$ )

$T_m$  = torsi mekanik yang dihasilkan oleh *prime mover* dikurangi torsi perlambatan akibat rugi-rugi mekanik (Nm)

$T_e$  = torsi elektrik yang menghasilkan total *output* daya tiga fasa dari generator ditambah rugi-rugi elektrik (Nm)

$T_a$  = torsi percepatan *net* (Nm)

dengan persamaan percepatan sudut rotor adalah

$$\alpha_m(t) = \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} \quad (2.2)$$

$$\omega_m(t) = \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Keterangan:

$\omega_m$  = kecepatan sudut rotor ( $rad/s$ )

$\theta_m$  = posisi sudut rotor terhadap sumbu stasioner (rad)

Ketika generator beroperasi dalam kondisi *steady state*,  $T_m$  dan  $T_e$  memiliki nilai yang sama sehingga  $T_a$  bernilai nol. Berdasarkan persamaan (2.1), percepatan sudut rotor  $\alpha_m$  juga akan bernilai nol dan menghasilkan kecepatan rotor yang konstan atau disebut dengan kecepatan sinkron. Ketika nilai  $T_m$  lebih besar dari  $T_e$ , maka  $T_a$  dan  $\alpha_m$  akan bernilai positif. Hal ini menyebabkan putaran rotor generator mengalami percepatan. Begitu pula sebaliknya, saat nilai  $T_m$  lebih kecil dari  $T_e$ , maka putaran rotor akan mengalami perlambatan.

Dalam menentukan posisi sudut rotor, akan lebih mudah jika menggunakan acuan terhadap sumbu referensi yang berotasi pada kecepatan sinkron dengan persamaan

$$\theta_m(t) = \omega_{msyn}t + \delta_m(t) \quad (2.4)$$

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} = \omega_{msyn} + \frac{d\delta_m(t)}{dt} \quad (2.5)$$

$$\frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m(t)}{dt^2} \quad (2.6)$$

Keterangan:

$\omega_{msyn}$  = kecepatan sudut sinkron pada rotor ( $rad/s$ )

$\delta_m$  = posisi sudut rotor terhadap sumbu referensi putaran sinkron (rad)

Maka berdasarkan persamaan (2.2) dan (2.6), persamaan (2.1) dapat ditulis menjadi

$$J \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} = J \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = T_a(t) = T_m(t) - T_e(t) \quad (2.7)$$

Untuk memudahkan perhitungan, satuan yang digunakan diubah dalam per-unit (p.u.) dengan membagi persamaan (2.7) dengan  $S_{rated}$ . Selain itu, berdasarkan prinsip dasar dinamika di mana daya merupakan hasil kali dari torsi dan kecepatan sudut, maka persamaan (2.7) juga dikalikan dengan  $\omega_m$ , sehingga persamaannya menjadi

$$J \frac{\omega_m(t)}{S_{rated}} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = \frac{\omega_m(t) T_a(t)}{S_{rated}} = \frac{\omega_m(t) T_m(t) - \omega_m(t) T_e(t)}{S_{rated}} \quad (2.8)$$

$$J \frac{\omega_m(t)}{S_{rated}} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = \frac{P_a(t)}{S_{rated}} = \frac{P_m(t) - P_e(t)}{S_{rated}} \quad (2.9)$$

$$J \frac{\omega_m(t)}{S_{rated}} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = P_{a \text{ p.u.}}(t) = P_{m \text{ p.u.}}(t) - P_{e \text{ p.u.}}(t) \quad (2.10)$$

Keterangan:

$P_{m \text{ p.u.}}(t)$  = daya mekanik yang dihasilkan *prime mover* dikurangi rugi-rugi mekanis (p.u.)

$P_{e \text{ p.u.}}(t)$  = daya elektrik *output* generator ditambah rugi elektrik (p.u.)

$P_{a \text{ p.u.}}(t)$  = daya percepatan *net* yang menyebabkan munculnya ketidakseimbangan antara dua parameter tersebut (p.u.)

Dalam studi kestabilan transien, terdapat suatu konstanta inersia mesin yang dilambangkan oleh  $H$  dengan satuan *Joule/VA* atau *per unit-second*.

$$H = \frac{\text{jumlah energi kinetik yang tersimpan dalam kecepatan sinkron}}{\text{rating VA mesin}}$$

$$H = \frac{1}{2} J \frac{\omega_{msyn}^2}{S_{rated}} \quad (2.11)$$

*Range* nilai konstanta  $H$  tidak terlalu lebar, umumnya berkisar antara 1 hingga 10 p.u. Sementara  $J$  memiliki nilai yang bervariasi bergantung pada tipe dan ukuran unit pembangkit.

Dengan menggabungkan persamaan (2.10) dan (2.11) diperoleh persamaan

$$2 H \frac{\omega_m(t)}{\omega_{msyn}^2} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = P_{a \text{ p.u.}}(t) = P_{m \text{ p.u.}}(t) - P_{e \text{ p.u.}}(t) \quad (2.12)$$

Jika kecepatan sudut rotor dalam satuan per unit didefinisikan dengan

$$\omega_{p.u.}(t) = \frac{\omega_m(t)}{\omega_{msyn}} \quad (2.13)$$

maka persamaan (2.12) dapat ditulis menjadi

$$2 H \frac{\omega_{p.u.}(t)}{\omega_{msyn}} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = P_{a p.u.}(t) = P_{m p.u.}(t) - P_{e p.u.}(t) \quad (2.14)$$

$$2 H \frac{\omega_{p.u.}(t)}{\omega_{syn}} \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} = P_{a p.u.}(t) = P_{m p.u.}(t) - P_{e p.u.}(t) \quad (2.15)$$

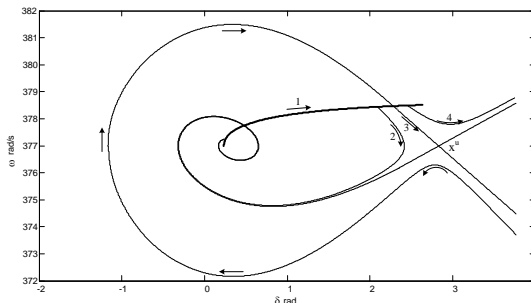
Persamaan (2.15) kemudian disebut sebagai persamaan ayunan mesin dan merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika rotasi suatu mesin sinkron pada studi kestabilan.

### 2.2.5 Critical Clearing Time (CCT)

Untuk mempertahankan kestabilan suatu sistem tenaga, gangguan yang terjadi pada sistem harus segera dihilangkan. *Critical Clearing Time* (CCT) atau waktu pemutusan kritis merupakan batas waktu maksimum yang diizinkan untuk memutus gangguan pada sistem. Sistem dapat kembali stabil jika gangguan diputus sebelum waktu CCT. Namun jika waktu pemutusan gangguan yang terjadi melebihi waktu CCT, maka generator akan kehilangan sinkronisasinya dan sistem menjadi tidak stabil.

#### 2.2.5.1 Critical Trajectory

Lintasan kritis (*critical trajectory*) dapat didefinisikan sebagai lintasan yang dimulai dari suatu titik pada lintasan terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*) hingga mencapai suatu titik kritis dimana sistem kehilangan sinkronisasinya [2]. Gambar 2.3 menunjukkan lintasan untuk sistem *single machine* yang terhubung dengan *infinite bus* tanpa *damping* (peredam).



**Gambar 2.3** Lintasan untuk sistem *single machine* yang terhubung dengan *infinite bus* tanpa *damping* [2].



Terdapat empat jenis lintasan yang menggambarkan suatu kondisi tertentu. Lintasan 1 merupakan lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*). Lintasan 2 merujuk pada kondisi stabil dari sistem, dimana gangguan dihilangkan cukup awal. Lintasan tersebut kemudian berosilasi di sekitar SEP (*Stable Equilibrium Point*). Lintasan 4 merujuk pada kondisi sistem yang tidak stabil akibat gangguan yang terlambat dihilangkan dari sistem. Sementara lintasan 3 adalah lintasan kritis (*critical trajectory*) yang menggambarkan kondisi kritis dari kestabilan suatu sistem.

### **2.2.6 Supercapacitor Energy Storage (SCES)**

Dibandingkan dengan baterai, proses *charging/discharging* pada kapasitor konvensional terbilang lebih cepat karena memiliki kerapatan daya yang relatif tinggi. Namun, baterai memiliki kerapatan energi yang lebih tinggi sehingga mampu menyimpan total energi yang lebih banyak dibanding kapasitor konvensional. Di sisi lain, superkapasitor merupakan salah satu teknologi penyimpanan energi dengan kerapatan daya yang lebih tinggi dibanding kapasitor konvensional dan kerapatan energi yang lebih tinggi dibanding baterai [7]. Prinsip kerja superkapasitor pada dasarnya sama seperti kapasitor konvensional. Namun, superkapasitor memiliki elektroda dengan permukaan yang lebih luas dan dielektrik yang lebih tipis sehingga jarak antar elektroda berkurang.

Karena kemampuannya untuk menyimpan dan melepaskan daya dalam jumlah yang besar dengan cepat, maka *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dapat digunakan untuk membantu meningkatkan kestabilan sistem selama periode transien saat sistem mengalami gangguan. Ketika kebutuhan beban sistem meningkat secara tiba-tiba, energi yang tersimpan dalam kapasitor akan segera dilepas ke dalam *grid* (jaringan). Jika *governor* dan mekanisme kontrol lainnya sudah mulai bekerja untuk mengatur sistem tenaga pada kondisi kesetimbangan baru, maka kapasitor akan kembali mengisi tegangannya (*charging*) sebesar nilai tegangan awalnya. Begitu pula saat terjadi pelepasan beban sistem secara tiba-tiba, kapasitor akan dengan segera berada dalam kondisi *charging* sampai penuh, di mana sebagian energi berlebih dalam sistem akan terserap. Ketika sistem kembali pada kondisi *steady state*, energi berlebih yang diserap kemudian dilepaskan dan tegangan kapasitor kembali ke nilai normalnya [8].

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 3**

### **PEMODELAN SISTEM**

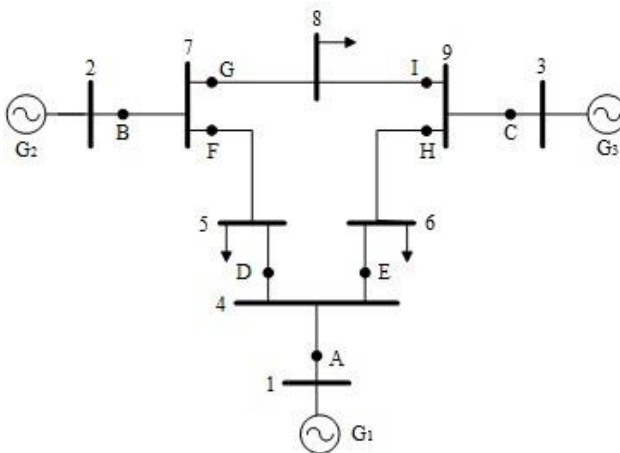
Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem saat sebelum dan setelah pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) diperoleh dengan menggunakan metode *Critical Trajectory* berdasarkan *Modified Losing Synchronism*. Dalam sistem, SCES dipasang pada salah satu bus generator. Penentuan lokasi peletakan SCES yang terbaik dipilih berdasarkan peningkatan terbesar nilai rata-rata CCT sistem setelah pemasangan SCES pada bus generator tertentu.

#### **3.1 Persiapan Data Awal**

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan sistem IEEE *7-machines 57-bus*. Diasumsikan bahwa setiap saluran transmisi terdiri atas saluran ganda dan terjadi gangguan tiga fasa (seimbang) pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Gangguan tersebut kemudian ditangani dengan membuka saluran yang mengalami gangguan. Data sistem Fouad and Anderson *3-machine 9-bus* dan sistem IEEE *7-machines 57-bus* kemudian digunakan sebagai parameter awal untuk mendapatkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem berdasarkan metode *Critical Trajectory*.

##### **3.1.1 Data Sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus***

Untuk sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*, telah ditentukan 9 titik lokasi terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi berupa gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. *Single line diagram* dari sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* beserta titik lokasi gangguan dapat dilihat pada gambar 3.1 berikut.



**Gambar 3. 1** *Single Line Diagram* sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan 9 titik lokasi gangguan.

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

Spesifikasi data saluran transmisi dan data bus sistem dapat dilihat pada tabel 3.1 dan tabel 3.2 berikut ini.

**Tabel 3. 1** Data saluran transmisi sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus

No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
1	1-4	0,0000	0,0576	0,0000

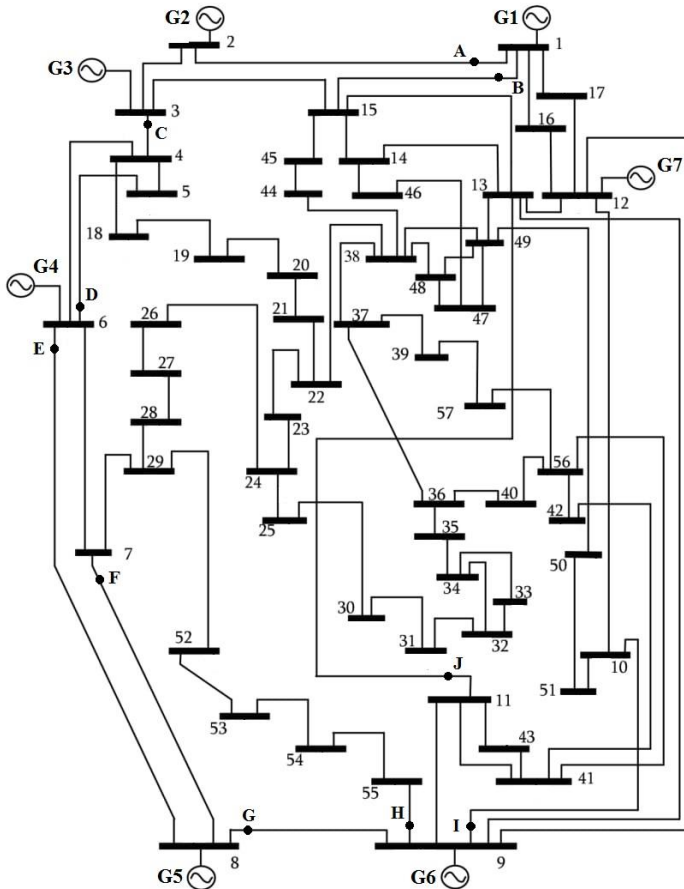
No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
2	2-7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3-9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4-5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4-6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5-7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6-9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7-8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8-9	0,0119	0,1008	0,1045

**Tabel 3. 2** Data bus sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus

No. Bus	Tegangan Bus	Power Generation		Load	
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,040	200,00	0,00	0,00	0,00
2	1,025	163,00	0,00	0,00	0,00
3	1,025	85,00	0,00	0,00	0,00
4	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,000	0,00	0,00	125,00	50,00
6	1,000	0,00	0,00	90,00	30,00
7	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,000	0,00	0,00	100,00	35,00
9	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00

### 3.1.2 Data Sistem IEEE 7-machine 57-bus

Untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus, telah ditentukan 10 titik lokasi terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi berupa gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. *Single line diagram* dari sistem IEEE 7-machine 57-bus beserta titik lokasi gangguan dapat dilihat pada gambar 3.2.



**Gambar 3. 2** *Single Line Diagram* sistem IEEE 7-machine 57-bus [9] dengan 10 titik lokasi gangguan.

Keterangan:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 2
- B : titik gangguan antara bus 1 dan bus 15
- C : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5
- D : titik gangguan antara bus 6 dan bus 5
- E : titik gangguan antara bus 6 dan bus 8
- F : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8
- G : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9
- H : titik gangguan antara bus 9 dan bus 10
- I : titik gangguan antara bus 9 dan bus 55
- J : titik gangguan antara bus 11 dan bus 13

Spesifikasi data saluran transmisi dan data bus sistem dapat dilihat pada tabel 3.3 dan tabel 3.4 berikut ini.

**Tabel 3. 3** Data saluran transmisi sistem IEEE 7-machine 57-bus

No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u.)</i>
1	1-2	0,0083	0,0280	0,0645
2	2-3	0,0298	0,0850	0,0409
3	3-4	0,1120	0,0366	0,0190
4	4-5	0,0625	0,1320	0,0129
5	4-6	0,0430	0,1480	0,0174
6	6-7	0,0200	0,1020	0,0138
7	6-8	0,0339	0,1730	0,0235
8	8-9	0,0099	0,0505	0,0274
9	9-10	0,0369	0,1679	0,0220
10	9-11	0,0258	0,0848	0,0109
11	9-12	0,0648	0,2950	0,0386
12	9-13	0,0481	0,1580	0,0203
13	13-14	0,0132	0,0434	0,0055

<b>No.</b>	<b>Line</b>	<b>R (p.u.)</b>	<b>X (p.u.)</b>	<b><i>Half Line Charging Susceptance (p.u.)</i></b>
14	13-15	0,0269	0,0869	0,0115
15	1-15	0,0178	0,0910	0,0494
16	1-16	0,0454	0,2060	0,0273
17	1-17	0,0238	0,1080	0,0143
18	3-15	0,0162	0,0530	0,0272
19	4-18	0,0000	0,2423	0,0000
20	5-6	0,0302	0,0641	0,0062
21	7-8	0,0139	0,0712	0,0097
22	10-12	0,0277	0,1262	0,0164
23	11-13	0,0223	0,0732	0,0094
24	12-13	0,0178	0,0580	0,0302
25	12-16	0,0180	0,0813	0,0108
26	12-17	0,0397	0,1790	0,2380
27	14-15	0,0171	0,0547	0,0074
28	18-19	0,4610	0,6850	0,0000
29	19-20	0,2830	0,4340	0,0000
30	20-21	0,0000	0,7767	0,0000
31	21-22	0,0736	0,1170	0,0000
32	22-23	0,0099	0,0152	0,0000
33	23-24	0,1660	0,2560	0,0042
34	24-25	0,0000	0,6028	0,0000
35	24-26	0,0000	0,0473	0,0000
36	26-27	0,1650	0,2540	0,0000



<b>No.</b>	<b>Line</b>	<b>R (p.u.)</b>	<b>X (p.u.)</b>	<b><i>Half Line Charging Susceptance (p.u.)</i></b>
37	27-28	0,0618	0,0954	0,0000
38	28-29	0,0418	0,0587	0,0000
39	7-29	0,0000	0,0648	0,0000
40	25-30	0,1350	0,2020	0,0000
41	30-31	0,3260	0,4970	0,0000
42	31-32	0,5070	0,7550	0,0000
43	32-33	0,0392	0,0360	0,0000
44	32-34	0,0000	0,9530	0,0000
45	34-35	0,0520	0,0780	0,0016
46	35-36	0,0430	0,0537	0,0008
47	36-37	0,0290	0,0366	0,0000
48	37-38	0,0651	0,1090	0,0010
49	37-39	0,0239	0,0379	0,0000
50	36-40	0,0300	0,0466	0,0000
51	22-38	0,0192	0,0295	0,0000
52	11-41	0,0000	0,7490	0,0000
53	41-42	0,2070	0,3520	0,0000
54	41-43	0,0000	0,4120	0,0000
55	38-44	0,0289	0,0585	0,0010
56	15-45	0,0000	0,1042	0,0000
57	14-46	0,0000	0,0735	0,0000
58	46-47	0,0230	0,0680	0,0016
59	47-48	0,0182	0,0233	0,0000

<b>No.</b>	<b>Line</b>	<b>R (p.u.)</b>	<b>X (p.u.)</b>	<b><i>Half Line Charging Susceptance (p.u.)</i></b>
60	48-49	0,0834	0,1290	0,0024
61	49-50	0,0801	0,1280	0,0000
62	50-51	0,1386	0,2200	0,0000
63	10-51	0,0000	0,0712	0,0000
64	13-49	0,0000	0,1910	0,0000
65	29-52	0,1442	0,1870	0,0000
66	52-53	0,0762	0,0984	0,0000
67	53-54	0,1878	0,2320	0,0000
68	54-55	0,1732	0,2265	0,0000
69	11-43	0,0000	0,1530	0,0000
70	44-45	0,0624	0,1242	0,0020
71	40-56	0,0000	1,1950	0,0000
72	41-56	0,5530	0,5490	0,0000
73	42-56	0,2125	0,3540	0,0000
74	39-57	0,0000	1,3550	0,0000
75	38-49	0,1740	0,2600	0,0000
76	38-49	0,1150	0,1770	0,0030
77	38-48	0,0312	0,0482	0,0000
78	9-55	0,0000	0,1205	0,0000

**Tabel 3. 4** Data bus sistem IEEE 7-machine 57-bus

No. Bus	Tegangan Bus	Power Generation		Load	
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,040	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,010	0,00	0,00	3,00	88,00
3	0,985	40,00	0,00	41,00	21,00
4	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,000	0,00	0,00	13,00	4,00
6	0,980	0,00	0,00	75,00	2,00
7	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,005	450,00	0,00	150,00	22,00
9	0,980	0,00	0,00	121,00	26,00
10	1,000	0,00	0,00	5,00	2,00
11	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,015	310,00	0,00	377,00	24,00
13	1,000	0,00	0,00	18,00	2,30
14	1,000	0,00	0,00	10,50	5,30
15	1,000	0,00	0,00	22,00	5,00
16	1,000	0,00	0,00	43,00	3,00
17	1,000	0,00	0,00	42,00	8,00
18	1,000	0,00	0,00	27,20	9,80
19	1,000	0,00	0,00	3,30	0,60
20	1,000	0,00	0,00	2,30	1,00
21	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00

No. Bus	Tegangan Bus	Power Generation		Load	
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
22	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1,000	0,00	0,00	6,30	2,10
24	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
25	1,000	0,00	0,00	6,30	3,20
26	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
27	1,000	0,00	0,00	9,30	0,50
28	1,000	0,00	0,00	4,60	2,30
29	1,000	0,00	0,00	17,00	2,60
30	1,000	0,00	0,00	3,60	1,80
31	1,000	0,00	0,00	5,80	2,90
32	1,000	0,00	0,00	1,60	0,80
33	1,000	0,00	0,00	3,80	1,90
34	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
35	1,000	0,00	0,00	6,00	3,00
36	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
37	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
38	1,000	0,00	0,00	14,00	7,00
39	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
40	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
41	1,000	0,00	0,00	6,30	3,00
42	1,000	0,00	0,00	7,10	4,40
43	1,000	0,00	0,00	2,00	1,00

No. Bus	Tegangan Bus	Power Generation		Load	
		P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
44	1,000	0,00	0,00	12,00	1,80
45	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
46	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
47	1,000	0,00	0,00	29,70	11,60
48	1,000	0,00	0,00	0,00	0,00
49	1,000	0,00	0,00	18,00	8,50
50	1,000	0,00	0,00	21,00	10,50
51	1,000	0,00	0,00	18,00	5,30
52	1,000	0,00	0,00	4,90	2,20
53	1,000	0,00	0,00	20,00	10,00
54	1,000	0,00	0,00	4,10	1,40
55	1,000	0,00	0,00	6,80	3,40
56	1,000	0,00	0,00	7,60	2,20
57	1,000	0,00	0,00	6,70	2,00

### 3.2 Perhitungan Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Menggunakan Metode *Critical Trajectory* Berdasarkan *Modified Losing Synchronism* [2]

Metode *Critical Trajectory* digunakan untuk memperoleh nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem. Terdapat beberapa tahap perhitungan yang dijelaskan secara sederhana sebagai berikut.

#### 3.2.1 *Power Flow*

Sebagai langkah awal, terlebih dulu dilakukan studi aliran daya (*Power Flow Analysis*) pada sistem. Informasi utama yang diperoleh dari analisa aliran daya adalah *magnitude* dan sudut fasa dari tegangan pada

setiap bus, serta daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada tiap saluran [10]. Hasil dari analisa aliran daya kemudian dapat digunakan sebagai kondisi inisial untuk analisa kestabilan transien.

Analisa aliran daya dimulai dengan pembacaan dan pemilihan data-data yang diperlukan, salah satunya adalah data admitansi sistem. Untuk membentuk suatu matriks admitansi  $Y_{bus}$ , masing-masing bus yang terinterkoneksi, baik bus beban maupun bus generator diberi nomor. Elemen  $Y_{ij}$  dari matriks admitansi  $Y_{bus}$  dapat ditulis sebagai berikut

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij}) \quad (3.1)$$

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.2)$$

dengan,

$G_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij}$  merupakan konduktansi saluran dan

$B_{ij} = |Y_{ij}| \sin \theta_{ij}$  merupakan susceptansi saluran.

Selain itu, tegangan bus pada sistem juga perlu didefinisikan nilainya. Tegangan pada bus  $i$  dapat ditulis

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (3.3)$$

Untuk sistem dengan jumlah bus sebanyak  $n$  bus, maka arus yang diinjeksikan pada bus  $i$  dapat dinyatakan dengan

$$I_i = Y_{i1} V_1 + Y_{i2} V_2 + Y_{i3} V_3 + \dots + Y_{in} V_n \quad (3.4)$$

$$I_i = \sum_i^n \sum_j^n Y_{ij} V_j \quad (3.5)$$

Kemudian, persamaan aliran daya secara umum adalah sebagai berikut

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = V_i^* \sum_i^n \sum_j^n Y_{ij} V_j \quad (3.6)$$

$$P_i - jQ_i = \sum_i^n \sum_j^n |Y_{ij} V_j V_i| \angle (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.7)$$

Persamaan (3.6) dapat dijabarkan menjadi persamaan daya aktif dan persamaan daya reaktif, yaitu

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |Y_{ij} V_j V_i| \cos (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.8)$$

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| \{G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)\} \quad (3.9)$$

$$Q_i = -\sum_i^n \sum_j^n |Y_{ij} V_j V_i| \sin (\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) \quad (3.10)$$

$$Q_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| \{G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)\} \quad (3.11)$$

Untuk menyelesaikan persamaan nonlinear tersebut, maka teknik iterasi Newton-Raphson dilibatkan dalam perhitungan aliran daya. Pada dasarnya, metode Newton-Raphson merupakan pengembangan dari deret Taylor pada suatu fungsi dengan dua atau lebih variabel. Dalam mengaplikasikan metode Newton-Raphson, tegangan bus dan admitansi saluran ditulis dalam bentuk polar. Persamaan (3.8) dan persamaan (3.10) kemudian dapat diperluas menggunakan deret Taylor dan dibuat dalam bentuk matriks menjadi

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_2|} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial |V_n|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Pada persamaan (3.12), bus 1 diasumsikan sebagai *slack bus*. Karena nilai  $|V_1|$  dan  $\delta_1$  dari bus 1 telah diketahui dan besarnya tetap, maka tidak perlu dimasukkan dalam perhitungan. Matriks Jacobian di atas dapat disederhanakan menjadi

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Elemen *diagonal* dan *off-diagonal* dari  $J_1$  adalah

$$\frac{\Delta P_i}{\partial \delta_i} = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.14)$$

$$\frac{\Delta P_i}{\partial \delta_j} = -\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.15)$$

Elemen *diagonal* dan *off-diagonal* dari  $J_2$  adalah

$$\frac{\Delta P_i}{\partial V_i} |V_i| = 2|V_i|^2 G_{ii} + \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.16)$$

$$\frac{\Delta P_i}{\partial V_j} |V_j| = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.17)$$

Elemen *diagonal* dan *off-diagonal* dari  $J_3$  adalah

$$\frac{\Delta Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.18)$$

$$\frac{\Delta Q_i}{\partial \delta_j} = -\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.19)$$

Elemen *diagonal* dan *off-diagonal* dari  $J_4$  adalah

$$\frac{\Delta Q_i}{\partial V_i} |V_i| = -2|V_i|^2 B_{ii} - \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.20)$$

$$\frac{\Delta Q_i}{\partial V_j} |V_j| = -\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \quad (3.21)$$

Dari perkalian matriks Jacobian tersebut diperoleh nilai  $\Delta \delta_i$  dan  $\Delta |V_i|$  yang kemudian digunakan untuk memperbarui sudut dan *magnitude* tegangan pada tiap bus. Iterasi akan terus berlanjut hingga batas ketelitian yang ditentukan telah terpenuhi atau iterasi maksimal telah tercapai.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \quad (3.22)$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}| \quad (3.23)$$

Keterangan:

$(k)$  = jumlah iterasi Newton-Raphson

$\Delta \delta_i^{(k)}$  = perubahan sudut tegangan pada bus- $i$

$\Delta |V_i^{(k)}|$  = perubahan *magnitude* tegangan pada bus- $i$

### 3.2.2 Reduksi Matriks

Untuk memudahkan analisa pada sistem tenaga berskala besar, dilakukan reduksi jumlah bus dalam sistem menggunakan metode Reduksi Kron. Metode ini akan mengeliminasi bus yang tidak memerlukan analisa secara detil, yaitu bus yang tidak terhubung dengan beban eksternal atau generator. Hal ini disebabkan karena arus injeksi pada bus tersebut selalu bernilai nol.

Elemen dari matriks admitansi bus yang telah direduksi dengan mengeliminasi bus  $p$  dapat dihitung menggunakan persamaan

$$Y_{ij}(\text{baru}) = Y_{ij}(\text{lama}) - \frac{Y_{ip} Y_{pj}}{Y_{pp}} \quad (3.24)$$

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

Pada studi kestabilan, semua bus dieliminasi kecuali bus generator. Persamaan (3.25) merupakan bentuk penyederhanaan dari matriks admitansi suatu sistem. Subskrip  $n$  merepresentasikan bus beban dan subskrip  $m$  merepresentasikan bus generator.  $I_m$  adalah arus generator,  $E_m$  adalah tegangan generator, dan  $V_n$  adalah tegangan beban.



$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

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

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Dari persamaan (3.26) dapat diperoleh persamaan berikut

$$0 = Y_{nn} V_n + Y_{nm} E_m \quad (3.27)$$

$$I_m = Y_{nm}^t V_n + Y_{mm} E_m \quad (3.28)$$

$$V_n = -Y_{nn}^{-1} Y_{nm} E_m \quad (3.29)$$

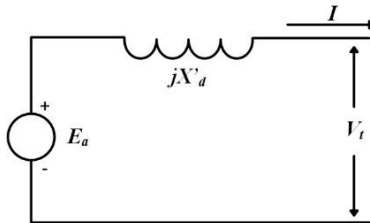
$$I_m = \{Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm}\} E_m = Y_{red} E_m \quad (3.30)$$

$$Y_{red} = Y_{mm} - Y_{nm}^t Y_{nn}^{-1} Y_{nm} \quad (3.31)$$

Dengan menggunakan persamaan (3.31), elemen dari matriks admittansi bus yang telah direduksi dengan dimensi ( $m \times m$ ) dapat diperoleh.

### 3.2.3 Perhitungan Tegangan Internal

Nilai tegangan tiap bus yang diperoleh dari studi aliran daya kemudian digunakan untuk mendapatkan tegangan internal generator  $E_a$ . Pemodelan generator dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut



**Gambar 3. 3** Pemodelan generator.

Berdasarkan gambar 3.3, tegangan internal  $E_a$  dapat diperoleh melalui persamaan

$$E_a = V_t + jX'_d I \quad (3.32)$$

$$E_a = |E_a| \angle \delta \quad (3.33)$$

di mana  $\delta$  adalah sudut rotor generator. Nilai  $E_a$  dapat digunakan untuk mencari daya mekanik  $P_m$  dan daya elektrik  $P_e$  generator.

### 3.2.4 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem *multi-machine* didefinisikan menggunakan model generator  $X'_d$ , di mana setiap generator direpresentasikan oleh dua persamaan diferensial. Persamaan ayunan berdasarkan referensi *Center of Inertia* (COI) atau *Center of Angle* (COA) dapat dituliskan dengan [11]

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\dot{\omega}_i) \quad (3.34)$$

$$\dot{\theta}_i = \tilde{\omega}_i \quad (3.35)$$

di mana,

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i; \omega_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \omega_i; \delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i; \quad (3.36)$$

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0; \tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0; P_{COA} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\theta)); \quad (3.37)$$

$$P_{ei}(\theta) = \sum_{j=i}^n Y_{ij} E_i E_j \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_{ij}) \quad (3.38)$$

$P_{mi}$  adalah daya mekanik generator ke- $i$ ;  $P_{ei}$  adalah daya elektrik generator ke- $i$ ;  $D_i$  adalah koefisien *damping* generator ke- $i$ ;  $\omega_i$  adalah kecepatan rotor generator ke- $i$ ;  $\delta_i$  dan  $\theta_i$  adalah penyimpangan sudut generator ke- $i$ ;  $M_i$  adalah momen inersia generator ke- $i$ ;  $M_T$  adalah total momen inersia; dan  $E_i$  adalah tegangan akhir reaktansi transien generator ke- $i$ .

### 3.2.5 Perumusan Masalah

Masalah terkait kestabilan transien akibat adanya gangguan pada sistem tenaga dapat didefinisikan sebagai berikut: Sistem tenaga awalnya beroperasi pada suatu titik stabil, yaitu  $x_{pre}$ , dan terjadi gangguan pada sistem ketika waktu  $t = 0$ . Kemudian, sistem berubah secara dinamis mengikuti respons sistem selama terjadinya gangguan  $[0, \tau]$  yang ditunjukkan sebagai berikut

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad (3.39)$$

di mana  $x = [\theta, \tilde{\omega}_i] \in R^N, t \in R, f_F: R^N \rightarrow R^N$ . Persamaan (3.34) dan persamaan (3.35) digunakan untuk mendefinisikan model sistem tenaga pada persamaan (3.39).

Lintasan 1 pada gambar 2.3 merupakan kurva hasil persamaan (3.39) yang disebut sebagai lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*) dan dinyatakan dengan

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.40)$$

di mana  $X_F(\cdot; x_{pre}) : R \rightarrow R^N$ .

Gangguan pada sistem kemudian diputus saat waktu  $t = \tau$ . Kondisi sistem setelah terjadinya gangguan (*post-fault*) secara dinamis dijelaskan dengan persamaan *nonlinear* berikut

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3.41)$$

Lintasan 2, 3, dan 4 pada gambar 2.3 merupakan kurva hasil persamaan (3.41) yang disebut sebagai lintasan setelah terjadinya gangguan (*post-fault trajectory*) dan direpresentasikan dengan

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(\cdot; x^0): R^N \rightarrow R^N \quad (3.42)$$

Sebagai catatan, titik awal  $x^0$  adalah suatu titik pada *fault-on trajectory* saat waktu  $t = \tau$  atau waktu pemutusan gangguan.

$$x^0 = X_F(\tau, x_{pre}) \quad (3.43)$$

Lintasan kritis (*critical trajectory*) didefinisikan sebagai lintasan setelah terjadinya gangguan (*post-fault trajectory*) dengan kondisi batasan sebagai berikut

1. Kondisi titik awal

Titik awal lintasan kritis berada pada *fault-on trajectory* ketika gangguan diputus saat waktu pemutusan kritis atau CCT, yaitu

$$x^0 = X_F(CCT, x_{pre}) \quad (3.44)$$

2. Kondisi titik akhir

Dalam tugas akhir ini, titik akhir (*end point*) akan direpresentasikan dengan “m+1”. Kondisi titik akhir dari metode yang digunakan berdasarkan pada kondisi hilangnya sinkronisasi yang dijelaskan sebagai berikut:

Pada sistem *single machine*, gaya sinkronisasi akan hilang saat  $\partial T / \partial \theta = 0$  atau  $\partial P / \partial \theta = 0$ , dengan T adalah torsi sinkronisasi, P adalah daya, dan  $\theta$  adalah sudut rotor. Untuk sistem *multi-machine*, kondisi hilangnya sinkronisasi dapat ditulis berdasarkan matriks koefisien berikut

$$0 = \left[ \frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v \text{ dengan } |v| \neq 0 \quad (3.45)$$

di mana  $v \in R^{N_{Gen}}$  adalah *eigenvector* yang bersesuaian dengan *zero eigenvalue* dari matriks  $[\partial P / \partial \theta] \in R^{N_{Gen} \times N_{Gen}}$  dengan  $N_{Gen}$  adalah jumlah generator. Diasumsikan suatu kondisi di mana *eigenvector* harus sesuai dengan perubahan arah  $\theta$ , sehingga berlaku skalar  $k_s \in R$  untuk persamaan

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \quad (3.46)$$

Persamaan (3.45) dan persamaan (3.46) digunakan untuk titik akhir dalam lintasan kritis. Untuk merepresentasikan kondisi stasioner dari torsi sinkronisasi T atau daya P, maka dituliskan persamaan

$$\dot{P} = 0 \quad (3.47)$$

dengan P adalah fungsi dari sudut rotor generator, sehingga berlaku

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad (3.48)$$

Untuk metode modifikasi hilangnya sinkronisasi (*Modified Losing Synchronism Method*), diasumsikan bahwa *eigenvector*  $v$  selalu searah terhadap UEP (*Unstable Equilibrium Point*), yaitu titik hilangnya sinkronisasi sistem, sehingga scalar  $k_s$  dapat dianggap konstan. Hal ini bertujuan untuk mengurangi jumlah persamaan yang diperlukan agar proses perhitungan menjadi lebih cepat.

Jika nilai  $k_s = 1$ , maka persamaan (3.46) dapat dituliskan menjadi

$$v = \dot{\theta} \quad (3.49)$$

dan diperoleh persamaan

$$0 = \left[ \frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot \dot{\theta} \quad (3.50)$$

### 3.2.6 Metode Runge-Kutta

Metode Runge-Kutta orde empat (*fourth-order Runge-Kutta*) dapat digunakan untuk memperoleh *fault-on trajectory* yang disimpan

sebagai  $x^0(\tau)$  dalam fungsi waktu,  $\tau$ . Rumus umum metode Runge-Kutta orde empat untuk mencari nilai  $x$  dengan step  $(n + 1)^{st}$  adalah

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3. 51)$$

dengan,

$$k_1 = f(x_n, t_n) \Delta t \quad (3. 52)$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (3. 53)$$

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t \quad (3. 54)$$

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta t) \Delta t \quad (3. 55)$$

Keterangan:

$k_1$  = (kemiringan pada awal *time step*)  $\Delta t$

$k_2$  = (pendekatan pertama untuk kemiringan pada pertengahan step)  $\Delta t$

$k_3$  = (pendekatan kedua untuk kemiringan pada pertengahan step)  $\Delta t$

$k_4$  = (kemiringan pada akhir step)  $\Delta t$

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

### 3.2.7 Metode Modifikasi Persamaan Trapezoidal

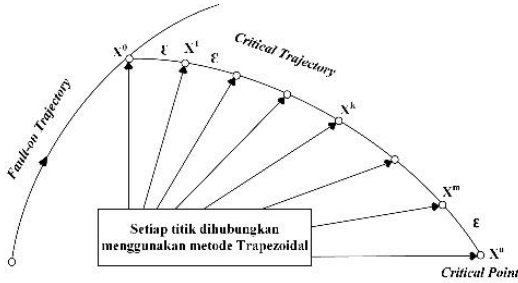
Penggunaan metode modifikasi persamaan trapezoidal merupakan salah satu tahap untuk memperoleh lintasan kritis. Penyelesaian dari persamaan (3.41) pada waktu  $t^k$  kemudian dinotasikan menjadi  $x^k$  dan persamaan berikutnya berlaku persamaan trapezoidal konvensional

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3. 56)$$

di mana

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

Superskrip  $k$  digunakan untuk menyatakan jumlah iterasi terhadap waktu.



**Gambar 3. 4** Modifikasi Trapezoidal

Gangguan yang terjadi pada sistem diputus saat waktu pemutusan kritis (CCT) dan nilai *state variable* akan konvergen pada suatu titik kritis. Untuk kasus tertentu, titik kritis memiliki nilai yang sama dengan UEP (*Unstable Equilibrium Point*) dan lintasan akan mencapai UEP dalam waktu yang tidak terbatas. Gambar 3.4 menunjukkan suatu lintasan kritis (*critical trajectory*) di mana terdapat dua titik batas, yaitu  $x^0$  dan  $x^u$ . Titik  $x^0$  merepresentasikan titik awal yaitu pada saat CCT dan  $x^u$  merepresentasikan titik kritis.

Karena waktu yang diperlukan lintasan untuk mencapai UEP nilainya tidak terbatas, lintasan kritis menjadi sulit diperoleh. Untuk mengatasi masalah perhitungan dengan batas waktu yang tidak terhingga, maka digunakan suatu metode integrasi numerik baru yang dijelaskan sebagai berikut: Jarak antara dua titik pada persamaan (3.56) didefinisikan dengan

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

Lalu, durasi waktu diubah menjadi jarak dengan persamaan

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.58)$$

Persamaan (3.58) disubstitusikan ke dalam persamaan (3.56) untuk mendapatkan persamaan dalam bentuk

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.59)$$

Dengan persamaan (3.59), integrasi numerik terhadap waktu dapat ditransformasikan ke dalam fungsi jarak. Transformasi ini memungkinkan untuk merepresentasikan lintasan kritis (*critical trajectory*) dengan sejumlah titik yang memiliki jarak sama.

### 3.2.8 Perumusan Minimalisasi

Perumusan masalah untuk mendapatkan kondisi kritis dari kestabilan transien dapat dijelaskan sebagai berikut

$$x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, k_s, v \quad \min_{\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \}} \quad (3.60)$$

di mana  $x^0 \in R^N, \varepsilon \in R, \tau \in R, k_s \in R, v \in R^{N_{Gen}}$

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

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.62)$$

dengan kondisi batasan

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.63)$$

$$\mu^{m+1} = \left[ \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot \theta \right] \quad (3.64)$$

W adalah matriks pembobotan berbentuk persegi dengan elemen diagonal bernilai positif. Penentuan matriks W tidak berpengaruh terhadap konvergensi maupun akurasi metode ini, sehingga digunakan matriks identitas untuk matriks W. Setelah minimisasi persamaan (3.60),  $\mu^k$  atau *error* numerik yang disebabkan oleh pendekatan trapezoidal idealnya bernilai nol, di mana persamaan trapezoidal yang dibahas pada persamaan (3.59) digunakan untuk menghubungkan semua titik  $x^k$ , mulai dari  $k = 0$  hingga  $k = (m + 1)$ , seperti yang terlihat pada gambar 3.4.

Persamaan (3.63) merupakan kondisi batas untuk titik awal yang menyatakan *fault-on trajectory* sebagai fungsi dari waktu pemutusan gangguan,  $\tau$ . Persamaan (3.62) merepresentasikan kondisi titik akhir untuk metode *Modified Losing Synchronism. Least square minimization problems* pada persamaan (3.60) diselesaikan dengan menggunakan metode Newton-Raphson untuk mendapatkan nilai CCT.

Secara singkat, penyelesaian dari persamaan (3.60)-(3.64) dijelaskan sebagai berikut: Himpunan titik  $x^k$ , dari  $k = 0$  hingga  $k = m + 1$ , merepresentasikan *critical trajectory* di mana nilai  $\varepsilon$  secara otomatis ditentukan saat jumlah *integration steps*  $m$  ditentukan. CCT dan titik kritis masing-masing diperoleh sebagai  $\tau$  dan  $x^{m+1}$  dalam penyelesaian permasalahan.

### 3.3 Modifikasi Sitem dengan Penambahan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES)

Pada tugas akhir ini, *controller* serta *state of charging-discharging* dari SCES tidak dimodelkan. Diasumsikan bahwa SCES pada sistem selalu berada dalam kondisi kosong, sehingga dapat langsung bekerja saat sistem mengalami gangguan. Selain itu, SCES dalam tugas akhir ini juga diasumsikan hanya bekerja dengan cara menyerap (*absorb*) daya, sehingga tidak ada daya keluar yang disuplai oleh SCES.

Perangkat *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dipasang pada salah satu bus generator dalam sistem. Ketika sistem mengalami gangguan tiga fasa, osilasi *first swing* akan bernilai sangat besar dan dapat menyebabkan peningkatan nilai sudut rotor generator sehingga sistem berpotensi kehilangan sinkronisasinya. Pemasangan SCES dalam sistem dapat meredam osilasi yang terjadi.

Kapasitas SCES ( $P_{SCES}$ ) telah ditentukan nilainya sebesar 0,1 p.u. atau setara dengan 10 MVA. Dalam sistem,  $P_{SCES}$  dimodelkan secara matematis melalui persamaan ayunan sistem berikut [4]

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e \quad (3. 65)$$

sehingga diperoleh

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e - P_{SCES} \quad (3. 66)$$

Keterangan:

$M$  = momen inersia

$\dot{\omega}$  = kecepatan sinkron (rad-mekanik/detik)

$P_{SCES}$  = daya SCES (p.u.)

### 3.4 Metodologi Pengerjaan

Simulasi pada tugas akhir ini dilakukan dalam dua kondisi, yaitu sistem tanpa SCES dan sistem dengan SCES. Diagram alir pada gambar 3.5 dan gambar 3.6 menunjukkan beberapa tahapan yang diperlukan untuk memperoleh nilai CCT sistem saat sebelum dan setelah pemasangan SCES.

Sebelum simulasi dimulai, terlebih dulu ditentukan beberapa titik lokasi terjadinya gangguan untuk masing-masing *plant* yang digunakan. Selain itu, data-data pendukung berupa data saluran dan data tiap bus dalam sistem dimasukkan sebagai parameter awal untuk tahap *power flow*



(aliran daya). Hasil dari analisa aliran daya dapat digunakan sebagai kondisi inisial pada studi kestabilan transien.

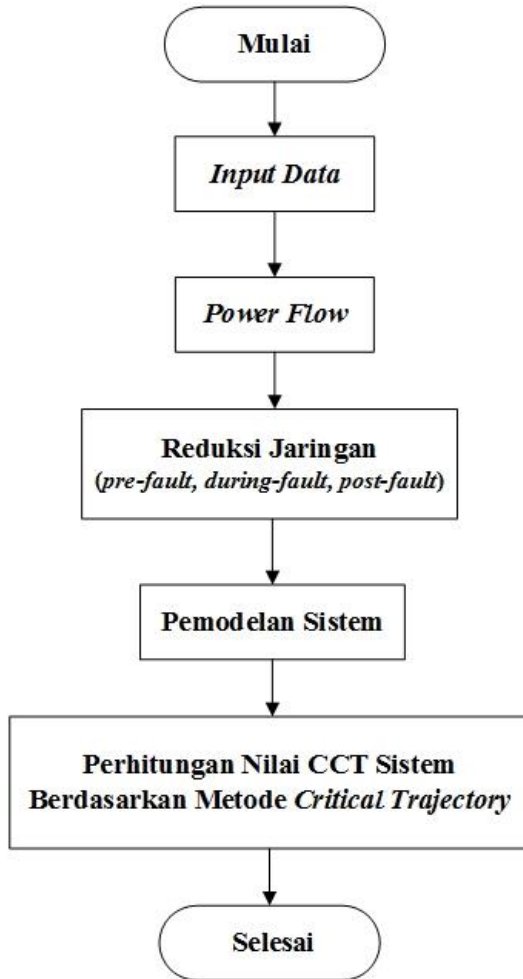
Setelah tahap *power flow*, jumlah bus dalam sistem kemudian direduksi menggunakan metode Reduksi Kron untuk memudahkan analisa sistem yang kompleks. Metode ini akan mengeliminasi bus yang tidak terhubung dengan beban eksternal atau generator. Hal ini disebabkan karena arus injeksi pada bus tersebut selalu bernilai nol.

Model generator  $X'_d$  digunakan untuk mendefinisikan sistem *multi-machine* di mana setiap generator direpresentasikan oleh dua persamaan diferensial. Persamaan ayunan berdasarkan referensi *Center of Inertia* (COI) atau *Center of Angle* (COA) dapat dilihat pada persamaan (3.4) dan persamaan (3.5).

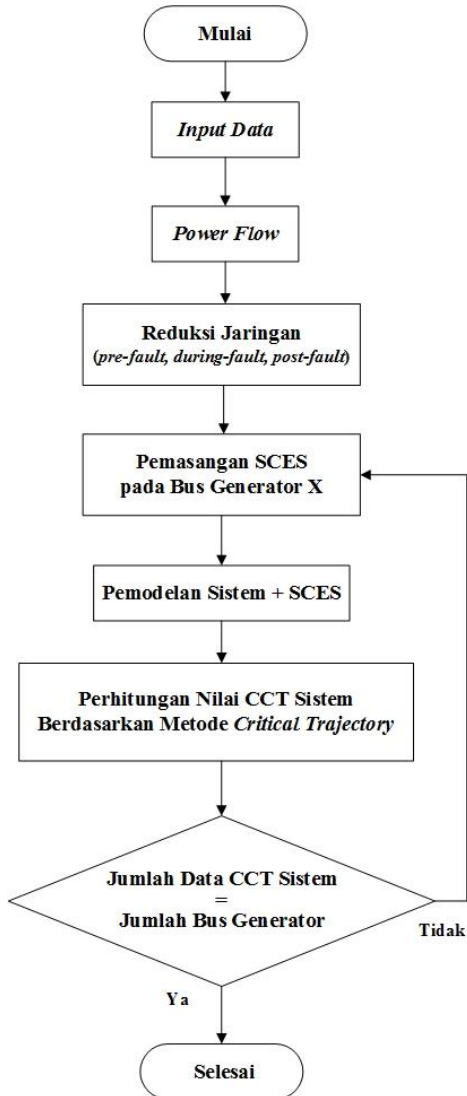
Berdasarkan gambar 3.6, untuk simulasi yang dilakukan pada sistem dengan SCES, terlebih dulu ditentukan bus generator mana yang akan menjadi lokasi peletakan SCES. Setelah itu, dilakukan modifikasi pada sistem dengan penambahan SCES sesuai persamaan (3.66). Sebagai catatan, kapasitas SCES yang digunakan telah ditentukan sebelumnya dan SCES hanya bekerja dengan cara menyerap (*absorb*) daya.

Langkah selanjutnya adalah perhitungan nilai CCT sistem berdasarkan metode *Critical Trajectory* seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 3.2. Untuk sistem tanpa SCES, proses akan berhenti setelah nilai CCT sistem diperoleh. Sementara untuk sistem dengan SCES, pemasangan SCES dilakukan secara bergantian pada salah satu bus generator. Tahap ini akan terus berulang hingga nilai CCT sistem untuk setiap *case* peletakan SCES pada salah satu bus generator diperoleh. Setelah jumlah data CCT sistem yang diperoleh sama dengan jumlah bus generator dalam sistem, maka proses akan berhenti.

Data nilai CCT sistem saat sebelum dan setelah pemasangan SCES kemudian digunakan untuk menentukan lokasi peletakan SCES dalam sistem. Bus generator terbaik dipilih berdasarkan peningkatan nilai rata-rata *Critical Clearing Time* (CCT) sistem terbesar setelah pemasangan SCES pada bus generator tersebut.



**Gambar 3. 5** Diagram alir untuk memperoleh nilai CCT sistem tanpa SCES.



**Gambar 3. 6** Diagram alir untuk memperoleh nilai CCT sistem dengan SCES.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 4**

### **SIMULASI DAN ANALISIS**

Pada bab ini dijelaskan mengenai hasil simulasi beserta analisis data untuk sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dan sistem IEEE *7-machines 57-bus*. Diasumsikan bahwa setiap saluran transmisi terdiri atas saluran ganda dan terjadi gangguan tiga fasa (seimbang) pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Gangguan tersebut kemudian ditangani dengan membuka saluran yang mengalami gangguan.

Simulasi dilakukan untuk mendapatkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem pada saat sebelum dan setelah pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES). Kapasitas SCES yang digunakan nilainya ditentukan sebesar 0,1 p.u. (10 MVA) dan dipasang pada salah satu bus generator. Pemilihan bus generator terbaik untuk meletakkan SCES dilakukan berdasarkan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem terbesar setelah pemasangan SCES pada bus generator tersebut.

#### **4.1 Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus***

Untuk simulasi dan analisis perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) yang dilakukan pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*, telah ditentukan 9 titik lokasi terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi berupa gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. *Single line diagram* dari sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* beserta titik lokasi gangguan dapat dilihat pada gambar 3.1.

##### **4.1.1 Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* tanpa *Supercapacitor Energy Storage* (SCES)**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) belum terpasang dalam sistem. Gambar 3.5 menunjukkan beberapa tahapan yang diperlukan untuk memperoleh nilai CCT sistem tanpa SCES.

Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional

*Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh. Metode konvensional TDS merupakan metode perhitungan tidak langsung di mana CCT yang dihasilkan berupa *range* waktu pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode *Critical Trajectory* termasuk dalam metode perhitungan langsung, sehingga nilai CCT dapat diketahui secara langsung.

**Tabel 4. 1** Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus tanpa SCES.

<b>Fault Point</b>	<b>Open Line</b>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<b>Error (%)</b>
A	1-4	0,34-0,35	0,3420	0
B	2-7	0,21-0,22	0,2128	0
C	3-9	0,25-0,26	0,2595	0
D	4-5	0,32-0,33	0,3260	0
E	4-6	0,32-0,33	0,3254	0
F	5-7	0,22-0,23	0,2246	0
G	7-8	0,23-0,24	0,2324	0
H	6-9	0,25-0,26	0,2574	0
I	8-9	0,26-0,27	0,2609	0

Tabel 4.1 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik A, *range* waktu pemutusan kritis yang dihasilkan metode TDS adalah 0,34 detik hingga 0,35 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,34 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,35 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,3420 detik.

Berdasarkan tabel 4.1 diketahui bahwa nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* untuk setiap titik gangguan masih berada dalam *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, sehingga *error* bernilai nol. *Error* terjadi jika nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* berada di luar

*range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS. Untuk menghitung besarnya *error* dapat digunakan persamaan berikut

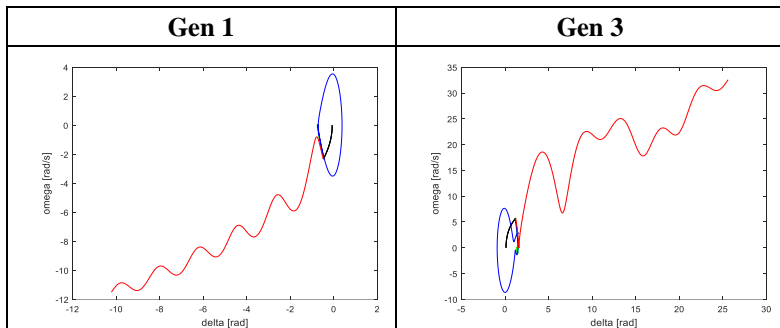
$$error (-) = \frac{CCT-rs}{rs} \quad (4.1)$$

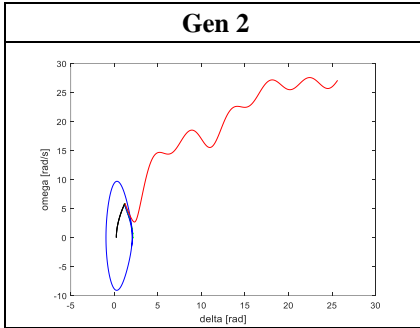
$$error (+) = \frac{CCT-ru}{ru} \quad (4.2)$$

dengan *rs* adalah batas bawah *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS (batas waktu stabil) dan *ru* adalah batas atas *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS (batas waktu tidak stabil). *Error*(-) menunjukkan nilai CCT kurang dari batas waktu stabil, sementara *error*(+) menunjukkan nilai CCT melebihi batas waktu tidak stabil.

Tabel 4.2 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus tanpa Supercapacitor Energy Storage (SCES) ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik A. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Sementara grafik Gen 2 dan Gen 3 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 dan generator 3.

**Tabel 4. 2** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus tanpa SCES saat terjadi gangguan di titik A.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

#### 4.1.2 Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES)

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator dalam sistem. Untuk mengetahui lokasi peletakan SCES terbaik, maka SCES dipasang pada salah satu bus generator secara bergantian sehingga diperoleh data nilai CCT sistem dari setiap *case* peletakan SCES. Tahap ini akan terus berulang hingga nilai CCT sistem untuk setiap *case* peletakan SCES pada salah satu bus generator diperoleh. Gambar 3.6 menunjukkan beberapa tahapan yang diperlukan untuk memperoleh nilai CCT sistem dengan SCES.

Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh. Metode konvensional TDS merupakan metode perhitungan tidak langsung di mana CCT yang dihasilkan berupa *range* waktu



pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode *Critical Trajectory* termasuk dalam metode perhitungan langsung, sehingga nilai CCT dapat diketahui secara langsung.

*Error* terjadi jika nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* berada di luar *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS. Untuk menghitung besarnya *error* dapat digunakan persamaan (4.1) dan persamaan (4.2).

**a. Analisa Nilai Critical Clearing Time (CCT) Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) pada Bus Generator 1**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 1 (bus 1). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 3** Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan SCES pada bus generator 1.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<i>Error (%)</i>
A	1-4	0,33-0,34	0,3328	0
B	2-7	0,20-0,21	0,2090	0
C	3-9	0,25-0,26	0,2562	0
D	4-5	0,31-0,32	0,3182	0
E	4-6	0,31-0,32	0,3176	0
F	5-7	0,22-0,23	0,2215	0
G	7-8	0,22-0,23	0,2285	0
H	6-9	0,25-0,36	0,2529	0

<b>Fault Point</b>	<b>Open Line</b>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<b>Error (%)</b>
I	8-9	0,25-0,26	0,2569	0

Tabel 4.3 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik A, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,33 hingga 0,34 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,33 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,34 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,3328 detik. Berdasarkan tabel 4.3 diketahui bahwa nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* untuk setiap gangguan masih berada dalam *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, sehingga *error* bernilai nol.

**Tabel 4. 4** Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 1.

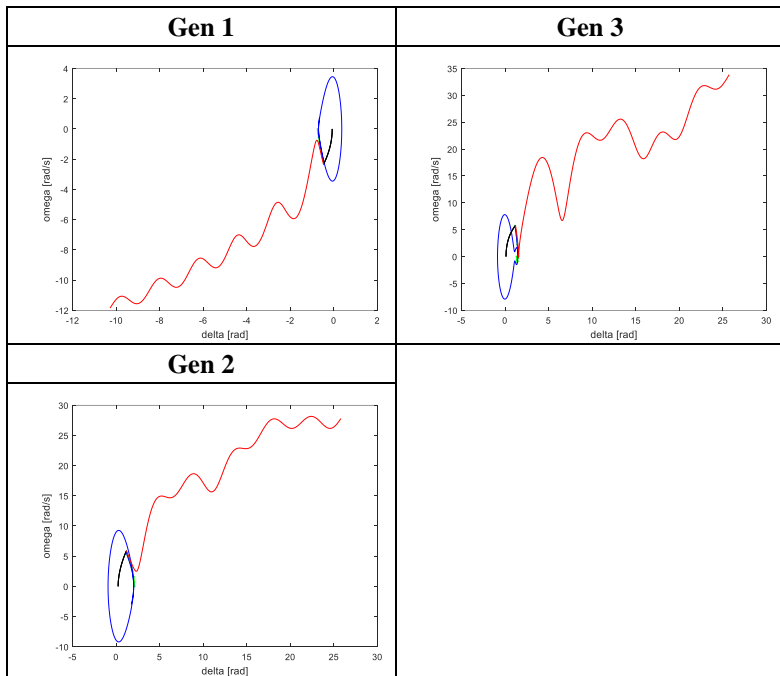
<b>Fault Point</b>	<b>Open Line</b>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
A	1-4	0,34-0,35	0,33-0,34	0,3420	0,3328	-2,69
B	2-7	0,21-0,22	0,20-0,21	0,2128	0,2090	-1,79
C	3-9	0,25-0,26	0,25-0,26	0,2595	0,2562	-1,27
D	4-5	0,32-0,33	0,31-0,32	0,3260	0,3182	-2,39
E	4-6	0,32-0,33	0,31-0,32	0,3254	0,3176	-2,40
F	5-7	0,22-0,23	0,22-0,23	0,2246	0,2215	-1,38
G	7-8	0,23-0,24	0,22-0,23	0,2324	0,2285	-1,68
H	6-9	0,25-0,26	0,25-0,36	0,2574	0,2529	-1,75
I	8-9	0,26-0,27	0,25-0,26	0,2609	0,2569	-1,53
<b>Rata-rata CCT sistem</b>				<b>0,2712</b>	<b>0,2660</b>	<b>-1,94</b>

Nilai selisih pada tabel 4.4 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif

menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.5 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) terasang pada bus generator 1 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik A. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Sementara grafik Gen 2 dan Gen 3 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 dan generator 3.

**Tabel 4.5** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan SCES pada bus generator 1 saat terjadi gangguan di titik A.



Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah

merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

**b. Analisa Nilai Critical Clearing Time (CCT) Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) pada Bus Generator 2**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 2 (bus 2). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 6** Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan SCES pada bus generator 2.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<i>Error (%)</i>
A	1-4	0,36-0,37	0,3667	0
B	2-7	0,22-0,23	0,2289	0
C	3-9	0,25-0,26	0,2578	0
D	4-5	0,34-0,35	0,3471	0
E	4-6	0,34-0,35	0,3464	0
F	5-7	0,24-0,25	0,2424	0
G	7-8	0,24-0,25	0,2474	0
H	6-9	0,26-0,27	0,2622	0
I	8-9	0,26-0,27	0,2635	0

Tabel 4.6 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik A, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,36 hingga 0,37 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,36 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan setelah batas waktu 0,37 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,3667 detik. Berdasarkan tabel 4.6 diketahui bahwa nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* untuk setiap gangguan masih berada dalam *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, sehingga *error* bernilai nol.

**Tabel 4. 7** Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 2.

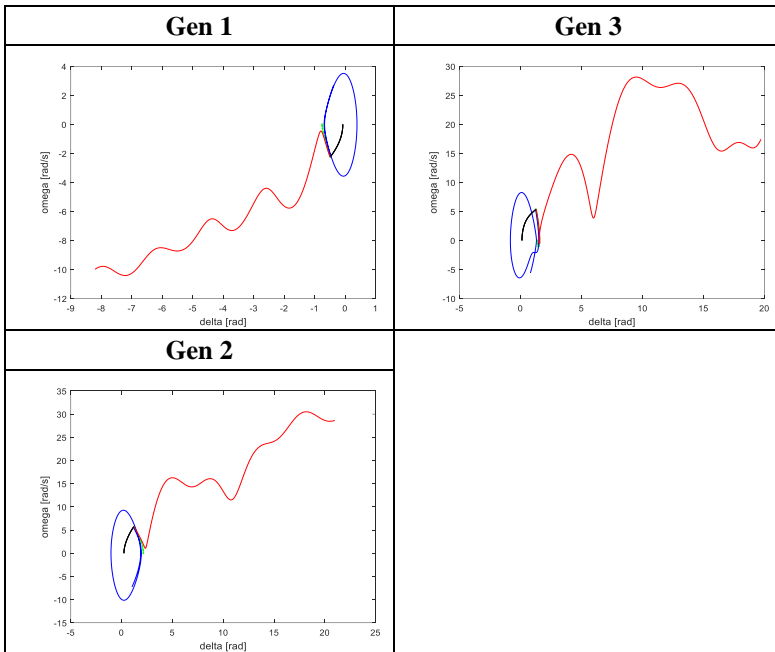
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Konvensional		Metode <i>Critical Trajectory</i>		
		Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
A	1-4	0,34-0,35	0,36-0,37	0,3420	0,3667	7,22
B	2-7	0,21-0,22	0,22-0,23	0,2128	0,2289	7,57
C	3-9	0,25-0,26	0,25-0,26	0,2595	0,2578	-0,66
D	4-5	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3260	0,3471	6,47
E	4-6	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3254	0,3464	6,45
F	5-7	0,22-0,23	0,24-0,25	0,2246	0,2424	7,93
G	7-8	0,23-0,24	0,24-0,25	0,2324	0,2474	6,45
H	6-9	0,25-0,26	0,26-0,27	0,2574	0,2622	1,86
I	8-9	0,26-0,27	0,26-0,27	0,2609	0,2635	1,00
<b>Rata-rata CCT sistem</b>				<b>0,2712</b>	<b>0,2847</b>	<b>4,97</b>

Nilai selisih pada tabel 4.7 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.8 menunjukkan grafik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan

*Supercapacitor Energy Storage (SCES)* terpasang pada bus generator 2 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik A. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Sementara grafik Gen 2 dan Gen 3 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 dan generator 3.

**Tabel 4. 8** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dengan SCES pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik A.



Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

**c. Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada Bus Generator 3**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 3 (bus 3). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 9** Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan SCES pada bus generator 3.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Konvensional	Metode <i>Critical Trajectory</i>	<i>Error (%)</i>
A	1-4	0,36-0,37	0,3667	0
B	2-7	0,21-0,22	0,2097	-0,14
C	3-9	0,28-0,29	0,2884	0
D	4-5	0,34-0,35	0,3470	0
E	4-6	0,34-0,35	0,3463	0
F	5-7	0,22-0,23	0,2209	0
G	7-8	0,23-0,24	0,2311	0
H	6-9	0,27-0,28	0,2777	0
I	8-9	0,28-0,29	0,2874	0

Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik A, range waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,36 hingga 0,37 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,36 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan setelah batas waktu 0,37 detik. Dengan menggunakan metode *critical trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,3667 detik. Berdasarkan tabel 4.9, terdapat *error* sebesar 0,14% pada titik gangguan

B. *Error* (-) menunjukkan nilai CCT kurang dari batas bawah *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS.

**Tabel 4. 10** Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 3.

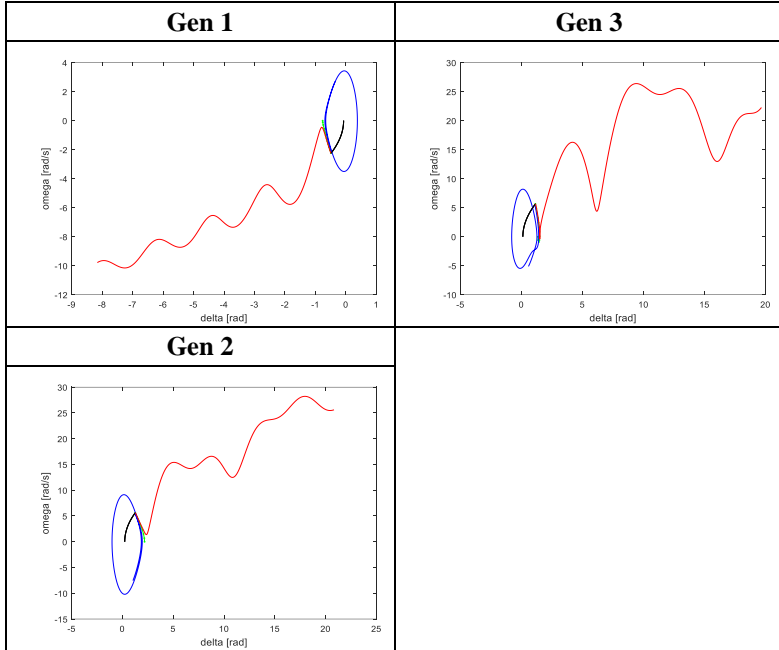
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
A	1-4	0,34-0,35	0,36-0,37	0,3420	0,3667	7,22
B	2-7	0,21-0,22	0,21-0,22	0,2128	0,2097	-1,46
C	3-9	0,25-0,26	0,27-0,28	0,2595	0,2884	11,14
D	4-5	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3260	0,347	6,44
E	4-6	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3254	0,3463	6,42
F	5-7	0,22-0,23	0,22-0,23	0,2246	0,2209	-1,65
G	7-8	0,23-0,24	0,23-0,24	0,2324	0,2311	-0,56
H	6-9	0,25-0,26	0,27-0,28	0,2574	0,2777	7,89
I	8-9	0,26-0,27	0,28-0,29	0,2609	0,2874	10,16
<b>Rata-Rata CCT Sistem</b>				<b>0,2712</b>	<b>0,2861</b>	<b>5,50</b>

Nilai selisih pada tabel 4.10 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.11 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terpasang pada bus generator 3 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik A. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Sementara grafik Gen 2 dan Gen 3 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 dan generator 3.



**Tabel 4. 11** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan SCES pada bus generator 3 saat terjadi gangguan di titik A.



Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

#### 4.1.3 Penentuan Lokasi Peletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dalam Sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus

Dalam memilih bus generator terbaik untuk meletakkan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES), diperlukan data nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem saat sebelum dan setelah pemasangan SCES.

Pemasangan SCES dilakukan secara bergantian pada salah satu bus generator untuk memperoleh nilai CCT sistem dari setiap *case* peletakan SCES. Karena simulasi dilakukan pada sistem Fouad dan Anderson 3-*machine 9-bus*, maka terdapat tiga pilihan lokasi peletakan SCES, yaitu bus generator 1, bus generator 2, dan bus generator 3. Nilai CCT sistem yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* untuk masing-masing *case* peletakan SCES dapat dilihat pada tabel 4.4, tabel 4.7, dan tabel 4.10.

**Tabel 4. 12** Rata-rata nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-*machine 9-bus* tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator.

Bus Generator	Rata-Rata CCT Sistem		Selisih (%)
	Tanpa SCES	Dengan SCES	
1	0,2712	0,2660	-1,94
2	0,2712	0,2847	4,97
3	0,2712	0,2861	5,50

Nilai selisih pada tabel 4.12 merupakan selisih antara nilai rata-rata CCT sistem dengan SCES dan nilai rata-rata CCT sistem tanpa SCES untuk masing-masing *case* peletakan SCES pada bus generator 1, bus generator 2, dan bus generator 3. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES pada bus generator tertentu, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES pada bus generator tertentu.

Selanjutnya dilakukan pemeringkatan (*ranking*) pada data selisih nilai rata-rata CCT yang telah diperoleh. Hal ini bertujuan untuk mengetahui lokasi peletakan SCES dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem terbesar yang sekaligus menjadi bus generator terbaik untuk meletakkan SCES. Berdasarkan tabel 4.12, *ranking* bus generator dengan peningkatan rata-rata nilai CCT sistem terbesar adalah:

1. Bus generator 3 (bus 3) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar 5,5 % (0,0149 detik).
2. Bus generator 2 (bus 2) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar 4,97% (0,0135 detik).

Meskipun pemasangan SCES pada bus generator 3 dapat memberikan peningkatan nilai CCT sistem terbesar dibanding pemasangan SCES di bus generator lain, namun berdasarkan tabel 4.10, terlihat adanya penurunan nilai CCT sistem saat terjadi gangguan di titik

B, F, dan G. Sementara itu, berdasarkan tabel 4.7, pemasangan SCES pada bus generator 2 hanya mengalami penurunan nilai CCT sistem saat terjadi gangguan di titik C.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*, bus generator terbaik untuk meletakkan SCES dengan kapasitas 10 MVA adalah bus generator 2 (bus 2) dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 4,97% (0,0135 detik) dan hanya terjadi satu kasus penurunan nilai CCT sistem, yaitu saat sistem mengalami gangguan di titik C.

## **4.2 Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada Sistem IEEE 7-machine 57-bus**

Untuk simulasi dan analisis perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) yang dilakukan pada sistem IEEE 7-machine 57-bus, telah ditentukan 10 titik lokasi terjadinya gangguan. Gangguan yang terjadi berupa gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. *Single line diagram* dari sistem IEEE 7-machine 57-bus beserta titik lokasi gangguan dapat dilihat pada gambar 3.2.

### **4.2.1 Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa *Supercapacitor Energy Storage* (SCES)**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) belum terpasang dalam sistem. Beberapa tahapan yang diperlukan untuk memperoleh nilai CCT sistem tanpa SCES dapat dilihat pada gambar 3.5.

Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh. Metode konvensional TDS merupakan metode perhitungan tidak langsung di mana CCT yang dihasilkan berupa *range* waktu pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode *Critical Trajectory* termasuk dalam metode perhitungan langsung, sehingga nilai CCT dapat diketahui secara langsung.

**Tabel 4. 13** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<i>Error (%)</i>
A	1-2	0,13-0,14	0,1341	0
B	1-15	0,13-0,14	0,1316	0
C	4-5	0,30-0,31	0,3079	0
D	6-5	0,18-0,19	0,1898	0
E	6-8	0,18-0,19	0,1886	0
F	7-8	0,19-0,20	0,1901	0
G	8-9	0,09-0,10	0,0993	0
H	9-10	0,13-0,14	0,1333	0
I	9-55	0,13-0,14	0,1338	0
J	11-13	0,30-0,31	0,3011	0

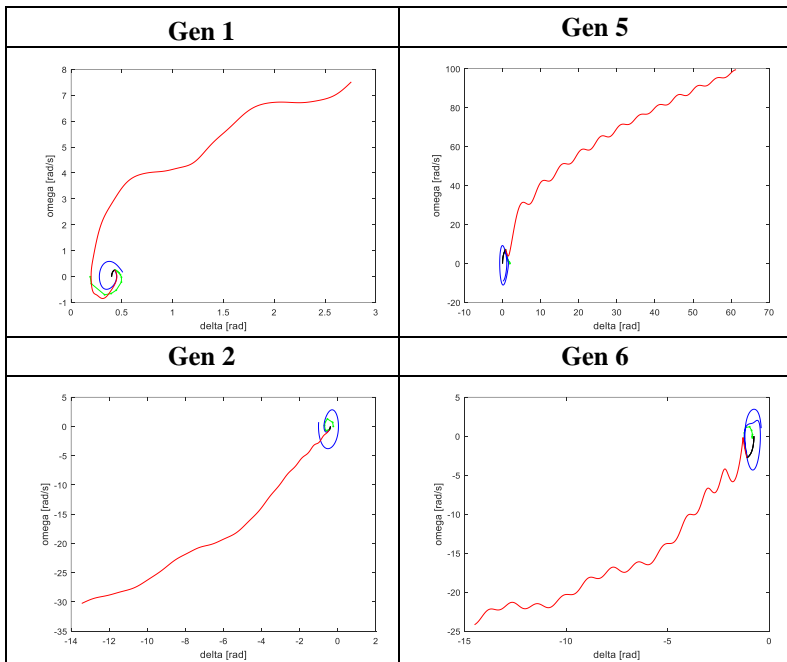
Tabel 4.13 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik F, *range* waktu pemutusan kritis yang dihasilkan metode TDS adalah 0,19 detik hingga 0,20 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,19 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,20 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,1901 detik.

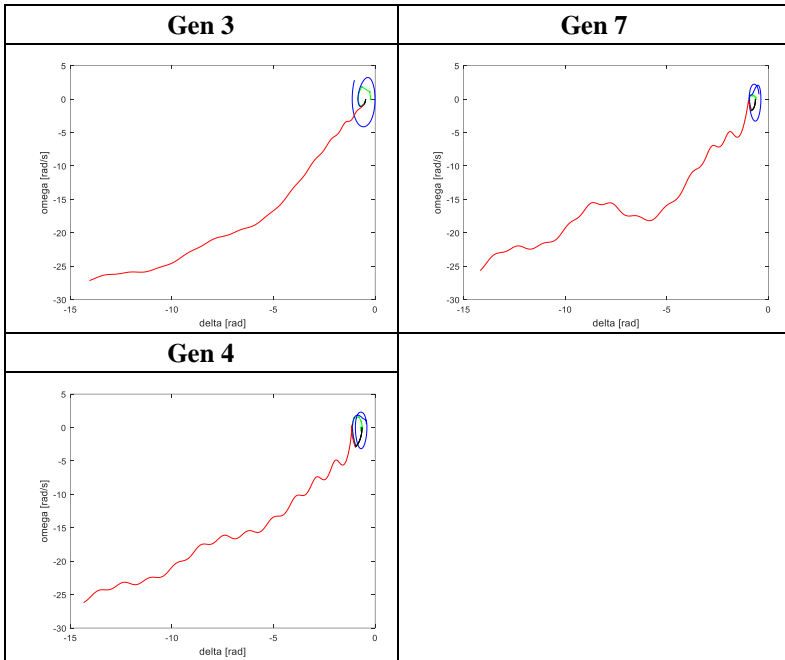
Berdasarkan tabel 4.13 diketahui bahwa nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* untuk setiap titik gangguan masih berada dalam *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, sehingga *error* bernilai nol. *Error* terjadi jika nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* berada di luar *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS. Untuk menghitung besarnya *error* dapat digunakan persamaan (4.1) dan persamaan (4.2).

Tabel 4.14 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) ketika terjadi gangguan tiga fasa

pada titik F. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Begitu pula grafik Gen 2 hingga grafik Gen 7 yang masing-masing menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 hingga generator 7.

**Tabel 4. 14** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES saat terjadi gangguan di titik F.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

#### 4.2.2 Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada Sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES)

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator dalam sistem. Untuk mengetahui lokasi peletakan SCES terbaik, maka SCES dipasang pada salah satu bus generator secara bergantian sehingga diperoleh data

nilai CCT sistem dari setiap *case* peletakan SCES. Tahap ini akan terus berulang hingga nilai CCT sistem untuk setiap *case* peletakan SCES pada salah satu bus generator diperoleh. Beberapa tahapan yang diperlukan untuk memperoleh nilai CCT sistem dengan SCES dapat dilihat pada gambar 3.6.

Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh. Metode konvensional TDS merupakan metode perhitungan tidak langsung di mana CCT yang dihasilkan berupa *range* waktu pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode *Critical Trajectory* termasuk dalam metode perhitungan langsung, sehingga nilai CCT dapat diketahui secara langsung.

*Error* terjadi jika nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* berada di luar *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS. Untuk menghitung besarnya *error* dapat digunakan persamaan (4.1) dan persamaan (4.2).

**a. Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada Bus Generator 1**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 1 (bus 1). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 15** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 1.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	Metode Konvensional	Metode <i>Critical Trajectory</i>	<i>Error (%)</i>
A	1-2	0,14-0,15	0,1473	0

<b>Fault Point</b>	<b>Open Line</b>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<b>Error (%)</b>
B	1-15	0,13-0,14	0,1363	0
C	4-5	0,31-0,32	0,3114	0
D	6-5	0,18-0,19	0,1896	0
E	6-8	0,18-0,19	0,1885	0
F	7-8	0,19-0,20	0,1901	0
G	8-9	0,09-0,10	0,0996	0
H	9-10	0,13-0,14	0,1325	0
I	9-55	0,13-0,14	0,1332	0
J	11-13	0,30-0,31	0,3022	0

Tabel 4.15 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik F, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,19 hingga 0,20 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,19 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,20 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,1901 detik. Berdasarkan tabel 4.15 diketahui bahwa nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* untuk setiap gangguan masih berada dalam *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, sehingga *error* bernilai nol.

**Tabel 4. 16** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 1.

<b>Fault Point</b>	<b>Open Line</b>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
A	1-2	0,13-0,14	0,14-0,15	0,1341	0,1473	9,84
B	1-15	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1316	0,1363	3,57

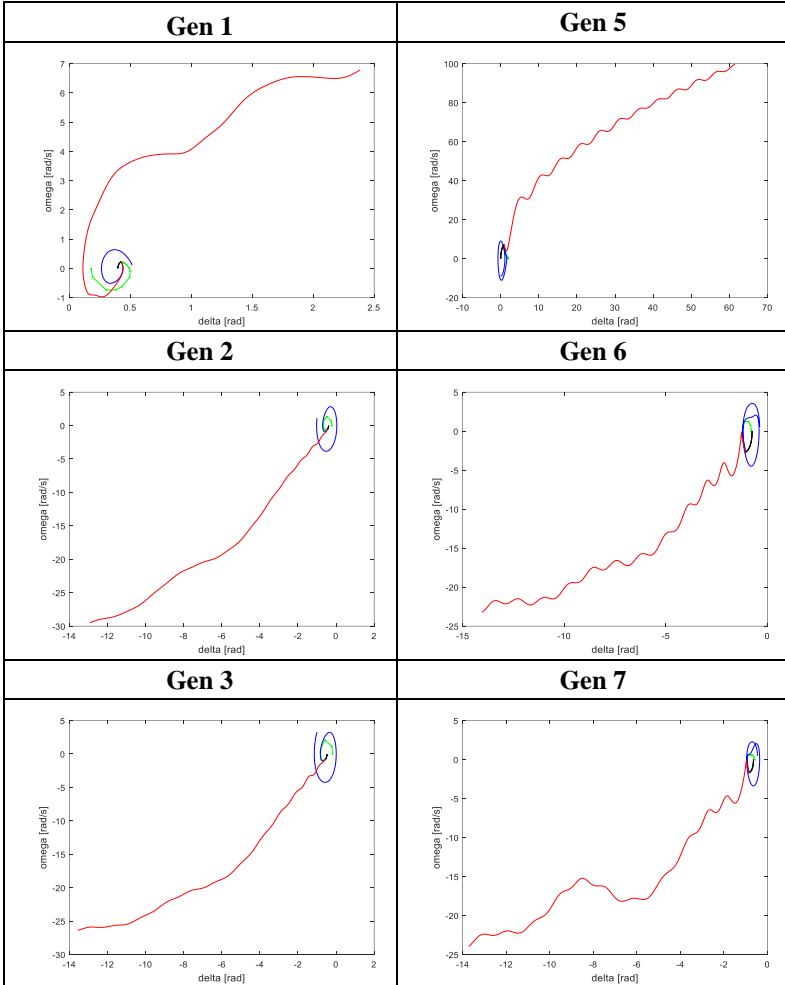


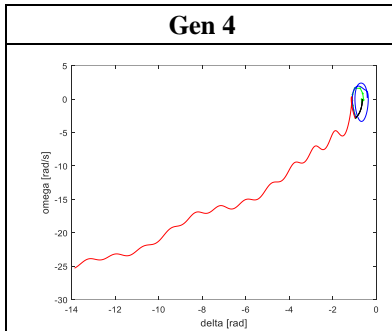
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
C	4-5	0,30-0,31	0,31-0,32	0,3079	0,3114	1,14
D	6-5	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1898	0,1896	-0,11
E	6-8	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1886	0,1885	-0,05
F	7-8	0,19-0,20	0,19-0,20	0,1901	0,1901	0,00
G	8-9	0,09-0,10	0,09-0,10	0,0993	0,0996	0,30
H	9-10	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1333	0,1325	-0,60
I	9-55	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1338	0,1332	-0,45
J	11-13	0,30-0,31	0,30-0,31	0,3011	0,3022	0,37
<b>Rata-rata CCT sistem</b>				<b>0,1810</b>	<b>0,1831</b>	<b>1,17</b>

Nilai selisih pada tabel 4.16 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.17 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terpasang pada bus generator 1 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik F. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Begitu pula grafik Gen 2 hingga grafik Gen 7 yang masing-masing menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 hingga generator 7.

**Tabel 4. 17** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 1 saat terjadi gangguan di titik F.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

**b. Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada Bus Generator 2**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 2 (bus 2). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 18** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 2.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<i>Error (%)</i>
A	1-2	0,13-0,14	0,1286	-1,08
B	1-15	0,12-0,13	0,1253	0
C	4-5	0,29-0,30	0,3026	0,87
D	6-5	0,18-0,19	0,1887	0
E	6-8	0,18-0,19	0,1872	0
F	7-8	0,18-0,19	0,1895	0
G	8-9	0,09-0,10	0,0987	0
H	9-10	0,13-0,14	0,1315	0
I	9-55	0,13-0,14	0,1326	0
J	11-13	0,30-0,31	0,2962	-1,27

Tabel 4.18 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik F, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,18 hingga 0,19 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,18 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,19 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,1895 detik.

Berdasarkan tabel 4.18, terdapat *error* untuk titik gangguan A, C, dan J. *Error* (-) menunjukkan nilai CCT kurang dari batas bawah *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS, sementara *error* (+) menunjukkan nilai CCT melebihi batas atas *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS.

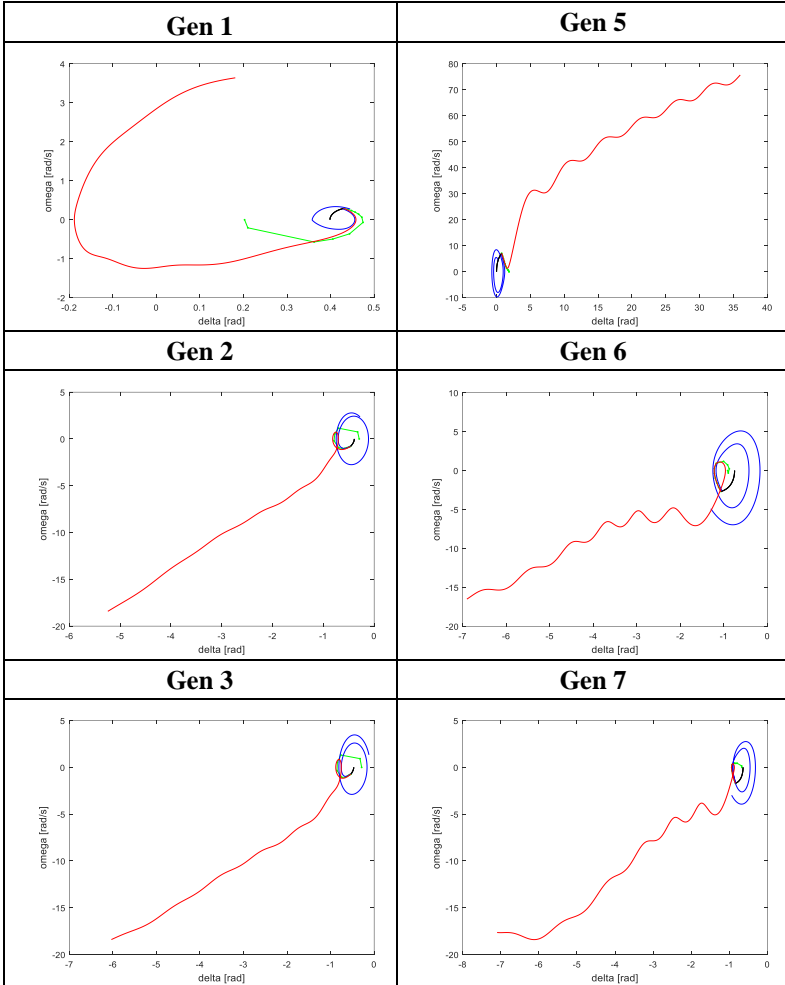
**Tabel 4. 19** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 2.

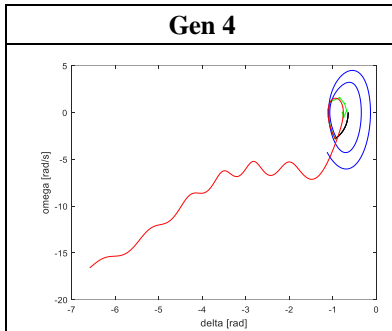
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
A	1-2	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1341	0,1286	-4,10
B	1-15	0,13-0,14	0,12-0,13	0,1316	0,1253	-4,79
C	4-5	0,30-0,31	0,29-0,30	0,3079	0,3026	-1,72
D	6-5	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1898	0,1887	-0,58
E	6-8	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1886	0,1872	-0,74
F	7-8	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1901	0,1895	-0,32
G	8-9	0,09-0,10	0,09-0,10	0,0993	0,0987	-0,60
H	9-10	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1333	0,1315	-1,35
I	9-55	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1338	0,1326	-0,90
J	11-13	0,30-0,31	0,30-0,31	0,3011	0,2962	-1,63
<b>Rata-rata CCT sistem</b>				<b>0,1810</b>	<b>0,1781</b>	<b>-1,59</b>

Nilai selisih pada tabel 4.19 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.20 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terpasang pada bus generator 2 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik F. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Begitu pula grafik Gen 2 hingga grafik Gen 7 yang masing-masing menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 hingga generator 7.

**Tabel 4. 20** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik F.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

**c. Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada Bus Generator 3**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 3 (bus 3). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 21** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 3.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<i>Error (%)</i>
A	1-2	0,13-0,14	0,1307	0
B	1-15	0,12-0,13	0,1252	0
C	4-5	0,29-0,30	0,3009	0,30
D	6-5	0,18-0,19	0,1883	0
E	6-8	0,18-0,19	0,1870	0
F	7-8	0,18-0,19	0,1892	0
G	8-9	0,09-0,10	0,0985	0
H	9-10	0,13-0,14	0,1328	0
I	9-55	0,13-0,14	0,1320	0
J	11-13	0,29-0,30	0,2970	0

Tabel 4.21 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik F, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,18 hingga 0,19 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,18 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,19 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,1892 detik.

Berdasarkan tabel 4.18, terdapat *error* untuk titik gangguan A, C, dan J. *Error* (-) menunjukkan nilai CCT kurang dari batas bawah *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS, sementara *error* (+) menunjukkan nilai CCT melebihi batas atas *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS.



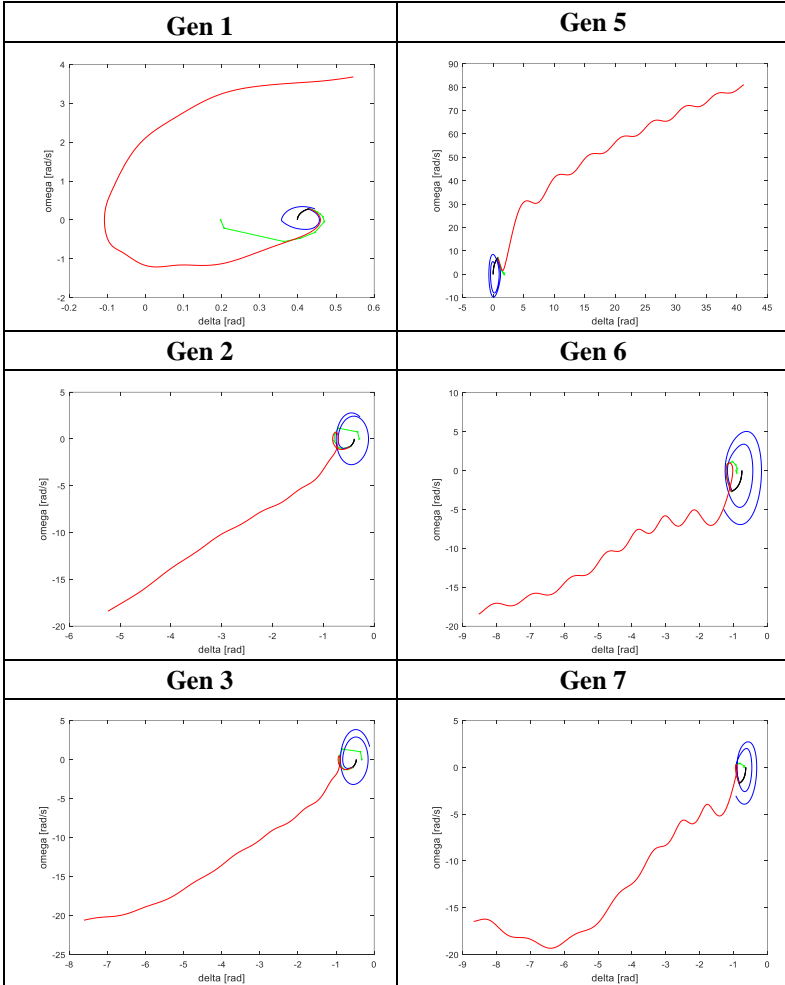
**Tabel 4. 22** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 3.

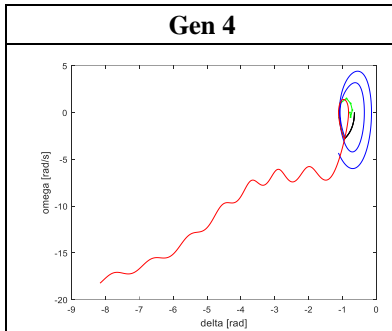
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
A	1-2	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1341	0,1307	-2,54
B	1-15	0,13-0,14	0,12-0,13	0,1316	0,1252	-4,86
C	4-5	0,30-0,31	0,29-0,30	0,3079	0,3009	-2,27
D	6-5	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1898	0,1883	-0,79
E	6-8	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1886	0,1870	-0,85
F	7-8	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1901	0,1892	-0,47
G	8-9	0,09-0,10	0,09-0,10	0,0993	0,0985	-0,81
H	9-10	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1333	0,1328	-0,38
I	9-55	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1338	0,1320	-1,35
J	11-13	0,30-0,31	0,29-0,30	0,3011	0,2970	-1,36
<b>Rata-Rata CCT Sistem</b>				<b>0,1810</b>	<b>0,1782</b>	<b>-1,55</b>

Nilai selisih pada tabel 4.22 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.23 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) yang terpasang pada bus generator 3 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik F. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Begitu pula grafik Gen 2 hingga grafik Gen 7 yang masing-masing menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 hingga generator 7.

**Tabel 4. 23** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 3 saat terjadi gangguan di titik F.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

**d. Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada Bus Generator 4**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 4 (bus 6). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 24** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 4.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<i>Error (%)</i>
A	1-2	0,13-0,14	0,1275	-1,92
B	1-15	0,12-0,13	0,1249	0
C	4-5	0,29-0,30	0,2922	0
D	6-5	0,18-0,19	0,1856	0
E	6-8	0,18-0,19	0,1846	0
F	7-8	0,18-0,19	0,1869	0
G	8-9	0,09-0,10	0,0981	0
H	9-10	0,13-0,14	0,1320	0
I	9-55	0,13-0,14	0,1324	0
J	11-13	0,29-0,30	0,2953	0

Tabel 4.24 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik F, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,18 hingga 0,19 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,18 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,19 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,1869 detik. Berdasarkan tabel 4.24, terdapat *error* sebesar 1,92% pada titik gangguan A. *Error* (-) menunjukkan nilai CCT kurang dari batas bawah *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS.

**Tabel 4. 25** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 4.

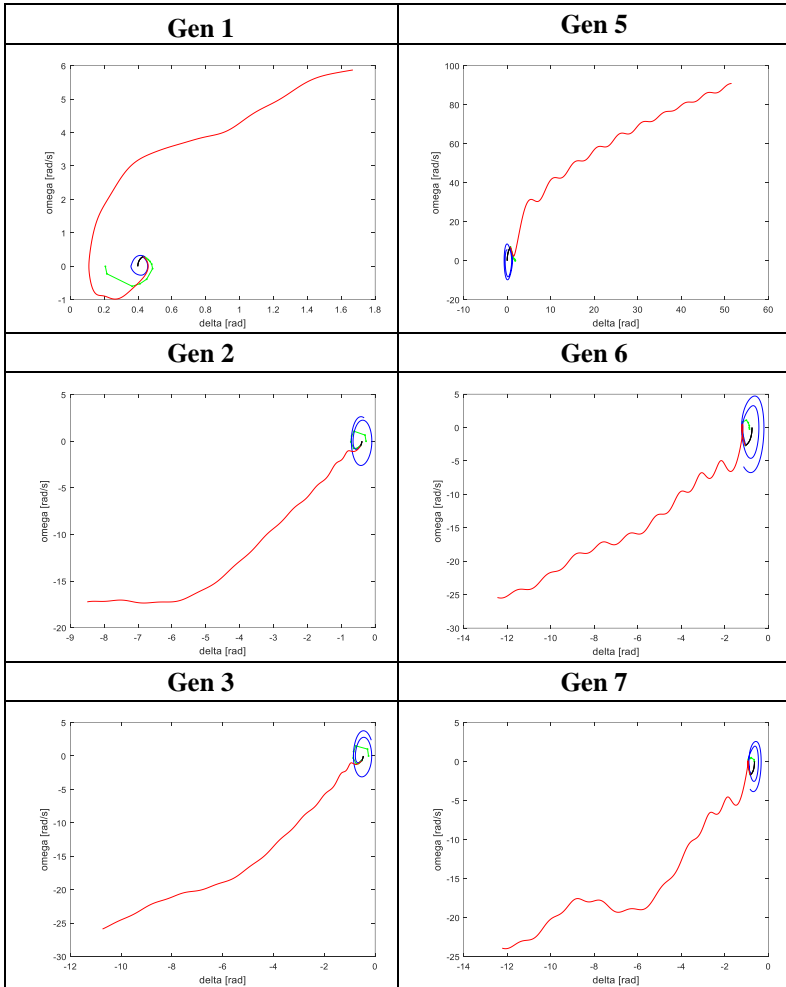
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
A	1-2	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1341	0,1275	-4,92

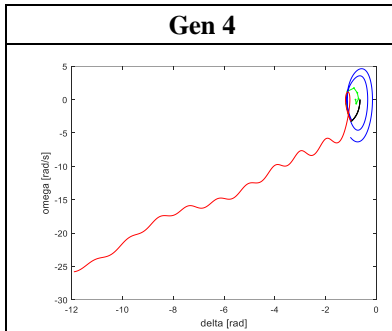
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode <i>Critical Trajectory</i></b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
B	1-15	0,13-0,14	0,12-0,13	0,1316	0,1249	-5,09
C	4-5	0,30-0,31	0,29-0,30	0,3079	0,2922	-5,10
D	6-5	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1898	0,1856	-2,21
E	6-8	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1886	0,1846	-2,12
F	7-8	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1901	0,1869	-1,68
G	8-9	0,09-0,10	0,09-0,10	0,0993	0,0981	-1,21
H	9-10	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1333	0,1320	-0,98
I	9-55	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1338	0,1324	-1,05
J	11-13	0,30-0,31	0,29-0,30	0,3011	0,2953	-1,93
<b>Rata-Rata CCT Sistem</b>				<b>0,1810</b>	<b>0,1760</b>	<b>-2,77</b>

Nilai selisih pada tabel 4.25 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.26 menunjukkan grafik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terpasang pada bus generator 4 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik F. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Begitu pula grafik Gen 2 hingga grafik Gen 7 yang masing-masing menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 hingga generator 7.

**Tabel 4. 26** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 4 saat terjadi gangguan di titik F.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

**e. Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada Bus Generator 5**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 5 (bus 8). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 27** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 5.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<i>Error (%)</i>
A	1-2	0,13-0,14	0,1389	0
B	1-15	0,12-0,13	0,1245	0
C	4-5	0,30-0,31	0,3023	0
D	6-5	0,20-0,21	0,2013	0
E	6-8	0,20-0,21	0,2003	0
F	7-8	0,20-0,21	0,2032	0
G	8-9	0,10-0,11	0,1040	0
H	9-10	0,13-0,14	0,1396	0
I	9-55	0,13-0,14	0,1401	0,07
J	11-13	0,33-0,34	0,3326	0

Tabel 4.27 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik F, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,20 hingga 0,21 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,20 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,21 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,2032 detik. Berdasarkan tabel 4.27, terdapat *error* sebesar 0,07% pada titik gangguan A. *Error* (+) menunjukkan nilai CCT melebihi batas atas *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS.

**Tabel 4. 28** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 5.

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
A	1-2	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1341	0,1389	3,58

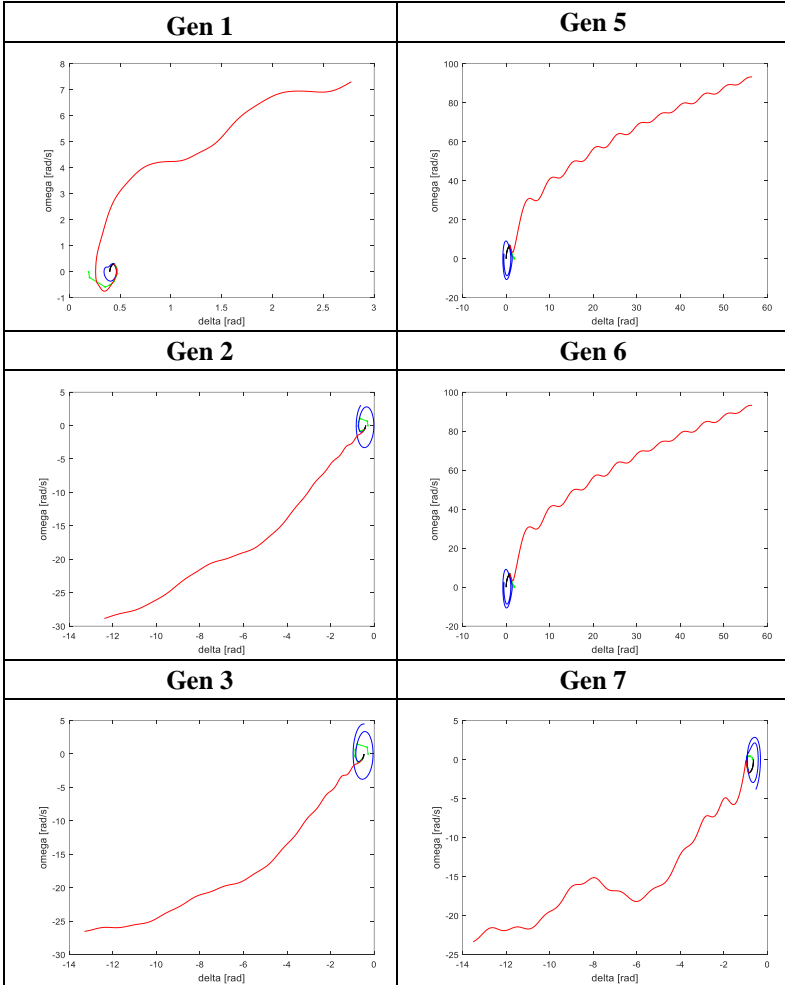


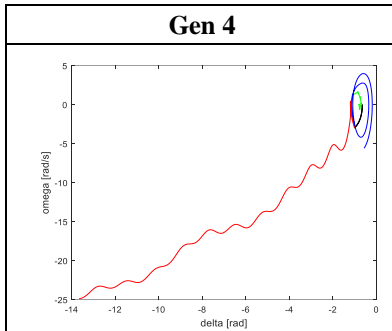
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode <i>Critical Trajectory</i></b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
B	1-15	0,13-0,14	0,12-0,13	0,1316	0,1245	-5,40
C	4-5	0,30-0,31	0,30-0,31	0,3079	0,3023	-1,82
D	6-5	0,18-0,19	0,20-0,21	0,1898	0,2013	6,06
E	6-8	0,18-0,19	0,20-0,21	0,1886	0,2003	6,20
F	7-8	0,19-0,20	0,20-0,21	0,1901	0,2032	6,89
G	8-9	0,09-0,10	0,10-0,11	0,0993	0,1040	4,73
H	9-10	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1333	0,1396	4,73
I	9-55	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1338	0,1401	4,71
J	11-13	0,30-0,31	0,33-0,34	0,3011	0,3326	10,46
<b>Rata-Rata CCT Sistem</b>				<b>0,1810</b>	<b>0,1887</b>	<b>4,27</b>

Nilai selisih pada tabel 4.28 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.29 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terpasang pada bus generator 5 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik F. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Begitu pula grafik Gen 2 hingga grafik Gen 7 yang masing-masing menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 hingga generator 7.

**Tabel 4. 29** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 5 saat terjadi gangguan di titik F.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

**f. Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada Bus Generator 6**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 6 (bus 9). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 30** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 6.

<b>Fault Point</b>	<b>Open Line</b>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode <i>Critical Trajectory</i></b>	<b>Error (%)</b>
A	1-2	0,13-0,14	0,1344	0
B	1-15	0,12-0,13	0,1246	0
C	4-5	0,29-0,30	0,2947	0
D	6-5	0,18-0,19	0,1868	0
E	6-8	0,18-0,19	0,1855	0
F	7-8	0,18-0,19	0,1872	0
G	8-9	0,09-0,10	0,0979	0
H	9-10	0,13-0,14	0,1309	0
I	9-55	0,13-0,14	0,1314	0
J	11-13	0,28-0,29	0,2891	0

Tabel 4.30 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik F, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,18 hingga 0,19 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,18 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,19 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,1872 detik. Berdasarkan tabel 4.30 diketahui bahwa nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* untuk setiap gangguan masih berada dalam *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, sehingga *error* bernilai nol.

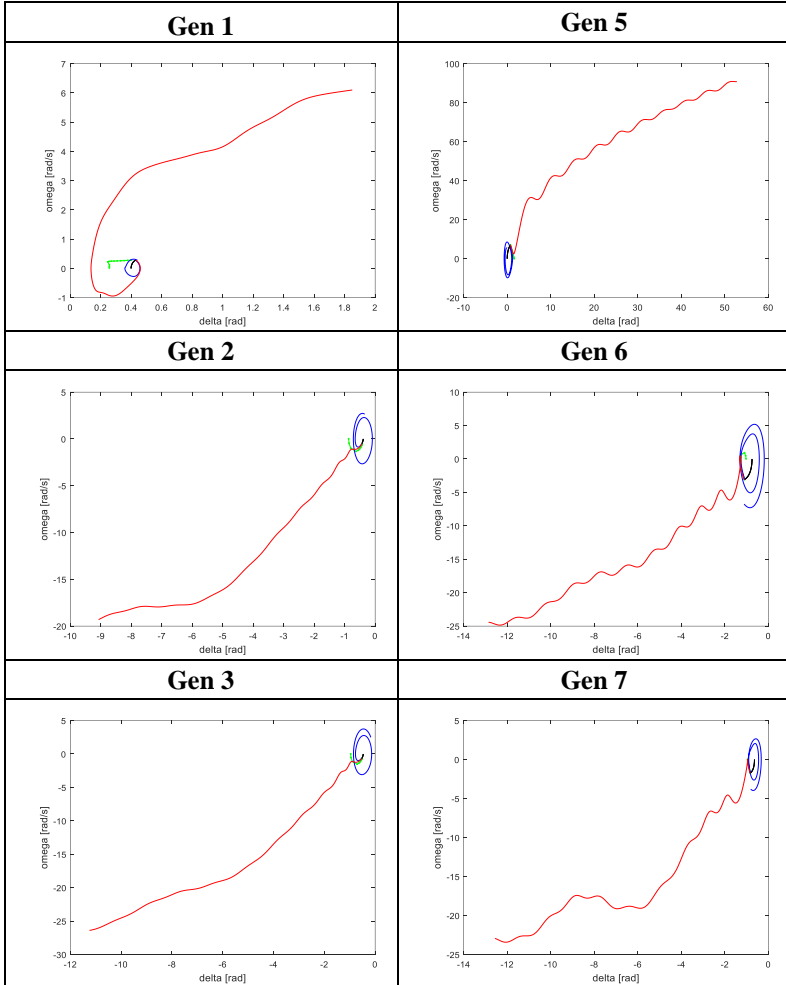
**Tabel 4. 31** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 6.

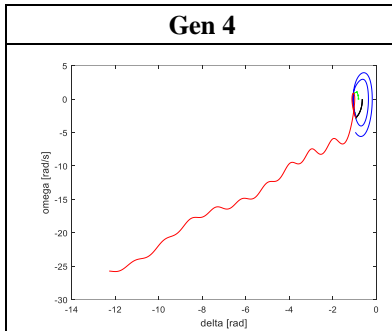
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
A	1-2	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1341	0,1344	0,22
B	1-15	0,13-0,14	0,12-0,13	0,1316	0,1246	-5,32
C	4-5	0,30-0,31	0,29-0,30	0,3079	0,2947	-4,29
D	6-5	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1898	0,1868	-1,58
E	6-8	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1886	0,1855	-1,64
F	7-8	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1901	0,1872	-1,53
G	8-9	0,09-0,10	0,09-0,10	0,0993	0,0979	-1,41
H	9-10	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1333	0,1309	-1,80
I	9-55	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1338	0,1314	-1,79
J	11-13	0,30-0,31	0,28-0,29	0,3011	0,2891	-3,99
<b>Rata-Rata CCT Sistem</b>				<b>0,1810</b>	<b>0,1763</b>	<b>-2,60</b>

Nilai selisih pada tabel 4.31 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.32 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terpasang pada bus generator 6 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik F. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Begitu pula grafik Gen 2 hingga grafik Gen 7 yang masing-masing menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 hingga generator 7.

**Tabel 4. 32** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 6 saat terjadi gangguan di titik F.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

**g. Analisa Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada Bus Generator 7**

Simulasi perhitungan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dilakukan dalam kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 7 (bus 12). SCES yang digunakan memiliki kapasitas sebesar 0,1 p.u. (10 MVA). Diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* kemudian akan dibandingkan dengan hasil dari metode konvensional *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

**Tabel 4. 33** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 7.

<b><i>Fault Point</i></b>	<b><i>Open Line</i></b>	<b>Metode Konvensional</b>	<b>Metode Critical Trajectory</b>	<b><i>Error (%)</i></b>
A	1-2	0,13-0,14	0,1274	-2,00
B	1-15	0,12-0,13	0,1247	0
C	4-5	0,29-0,30	0,2967	0
D	6-5	0,18-0,19	0,1875	0
E	6-8	0,18-.0,19	0,1859	0
F	7-8	0,18-0,19	0,1879	0
G	8-9	0,09-0,10	0,0984	0
H	9-10	0,13-0,14	0,1323	0
I	9-55	0,13-0,14	0,1312	0
J	11-13	0,29-0,30	0,2955	0

Tabel 4.33 menunjukkan hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh saat terjadi gangguan pada titik F, *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS adalah 0,18 hingga 0,19 detik. Hal ini berarti sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waktu 0,18 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,19 detik. Dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*, batas waktu pemutusan kritis (CCT) dapat diperoleh secara langsung, yaitu sebesar 0,1879 detik.

Berdasarkan tabel 4.33, terdapat *error* sebesar 2% pada titik gangguan A. *Error* (-) menunjukkan nilai CCT kurang dari batas bawah *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS.

**Tabel 4. 34** Nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator 7.

<b><i>Fault Point</i></b>	<b><i>Open Line</i></b>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode Critical Trajectory</b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
A	1-2	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1341	0,1274	-5,00

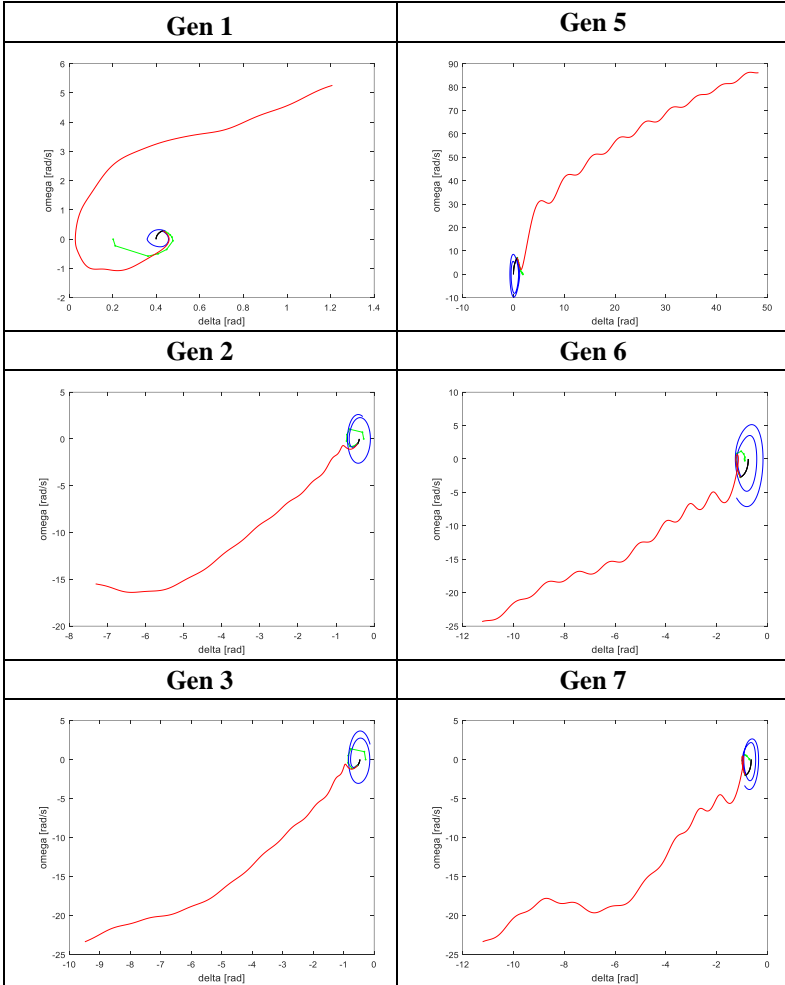


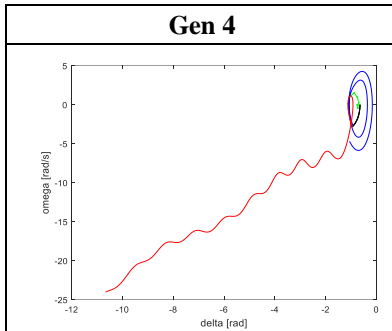
<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<b>Metode Konvensional</b>		<b>Metode <i>Critical Trajectory</i></b>		
		<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Tanpa SCES</b>	<b>Dengan SCES</b>	<b>Selisih (%)</b>
B	1-15	0,13-0,14	0,12-0,13	0,1316	0,1247	-5,24
C	4-5	0,30-0,31	0,29-0,30	0,3079	0,2967	-3,64
D	6-5	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1898	0,1875	-1,21
E	6-8	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1886	0,1859	-1,43
F	7-8	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1901	0,1879	-1,16
G	8-9	0,09-0,10	0,09-0,10	0,0993	0,0984	-0,91
H	9-10	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1333	0,1323	-0,75
I	9-55	0,13-0,14	0,13-0,14	0,1338	0,1312	-1,94
J	11-13	0,30-0,31	0,29-0,30	0,3011	0,2955	-1,86
<b>Rata-Rata CCT Sistem</b>				<b>0,1810</b>	<b>0,1768</b>	<b>-2,33</b>

Nilai selisih pada tabel 4.34 merupakan selisih antara nilai CCT sistem dengan SCES dan nilai CCT sistem tanpa SCES. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Tabel 4.35 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor ( $\omega$ ) terhadap sudut rotor ( $\delta$ ) pada sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terpasang pada bus generator 7 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik F. Grafik Gen 1 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 1. Begitu pula grafik Gen 2 hingga grafik Gen 7 yang masing-masing menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2 hingga generator 7.

**Tabel 4. 35** Grafik karakteristik  $\omega$  (rad/s) terhadap  $\delta$  (rad) untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus dengan SCES pada bus generator 7 saat terjadi gangguan di titik F.





Terdapat tiga warna kurva yang berbeda pada setiap grafik yang ditampilkan, yaitu warna merah, biru, dan hijau. Kurva berwarna merah merupakan kurva batas atas *range* nilai CCT atau batas waktu tidak stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna biru merupakan kurva batas bawah *range* nilai CCT atau batas waktu stabil yang diperoleh menggunakan metode konvensional TDS. Kurva berwarna hijau merupakan kurva nilai CCT yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*.

#### 4.2.3 Penentuan Lokasi Peletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dalam Sistem IEEE 7-machine 57-bus

Dalam memilih bus generator terbaik untuk meletakkan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES), diperlukan data nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem saat sebelum dan setelah pemasangan SCES. Pemasangan SCES dilakukan secara bergantian pada salah satu bus generator untuk memperoleh nilai CCT sistem dari setiap *case* peletakan SCES. Karena simulasi dilakukan pada sistem IEEE 7-machine 57-bus, maka terdapat tujuh pilihan lokasi peletakan SCES, yaitu bus generator 1 hingga bus generator 7. Nilai CCT sistem berdasarkan metode *Critical Trajectory* untuk masing-masing *case* peletakan SCES dapat dilihat pada tabel 4.28, tabel 4.31, dan tabel 4.34.

**Tabel 4. 36** Rata-rata nilai CCT untuk sistem IEEE 7-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator.

Bus Generator	Rata-Rata CCT Sistem		Selisih (%)
	Tanpa SCES	Dengan SCES	
1	0,1810	0,1831	1,17
2	0,1810	0,1781	-1,59
3	0,1810	0,1782	-1,55
4	0,1810	0,1760	-2,77
5	0,1810	0,1887	4,27
6	0,1810	0,1763	-2,60
7	0,1810	0,1768	-2,33

Nilai selisih pada tabel 4.36 merupakan selisih antara nilai rata-rata CCT sistem dengan SCES dan nilai rata-rata CCT sistem tanpa SCES untuk masing-masing *case* peletakan SCES pada bus generator 1 hingga bus generator 7. Tanda positif menunjukkan adanya peningkatan nilai CCT setelah pemasangan SCES pada bus generator tertentu, sementara tanda negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES pada bus generator tertentu.

Selanjutnya dilakukan pemeringkatan (*ranking*) pada data selisih nilai rata-rata CCT yang telah diperoleh. Hal ini bertujuan untuk mengetahui lokasi peletakan SCES dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem terbesar yang sekaligus menjadi bus generator terbaik untuk meletakan SCES. Berdasarkan tabel 4.36, *ranking* bus generator dengan peningkatan rata-rata nilai CCT sistem terbesar adalah:

1. Bus generator 5 (bus 8) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar 4,27% (0,0077 detik).
2. Bus generator 1 (bus 1) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar 1,17% (0,0021 detik).

Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada sistem IEEE 7-machine 57-bus, bus generator terbaik untuk meletakan SCES dengan kapasitas 10 MVA adalah bus generator 5 (bus 8) dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 4,27% (0,0077 detik).

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis data yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Untuk sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*, bus generator 2 (bus 2) dipilih sebagai lokasi peletakan SCES terbaik dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 4,97% (0,0135 detik).
2. Untuk sistem IEEE *7-machine 57-bus*, bus generator 5 (bus 8) dipilih sebagai lokasi peletakan SCES terbaik dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 4,27% (0,0077 detik).

#### **5.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Diperlukan pengembangan metode untuk menentukan lokasi peletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terbaik dalam sistem dengan lebih cepat dan praktis, sehingga tidak memerlukan pemeriksaan satu per satu secara manual.
2. Diperlukan adanya penelitian lebih lanjut terkait pengaruh peletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terhadap kenaikan dan penurunan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem.
3. Diperlukan optimasi kapasitas *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) yang digunakan, sehingga nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sistem yang diperoleh dapat lebih optimal.
4. Diperlukan adanya pengembangan lebih lanjut terkait pemodelan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dalam sistem.
5. Perlu dilakukan pengujian pada *plant* yang lebih kompleks dengan pilihan lokasi peletakan generator yang lebih banyak untuk membuktikan keakuratan metode dalam menentukan lokasi peletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada kondisi sistem yang bervariasi.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Saadat, *Power System Analysis*, Subsequent. McGraw-Hill College, 1998.
- [2] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui, dan M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, hlm. 1620–1626, Agu 2010.
- [3] T. P. Sari, A. Priyadi, dan M. Pujiantara, "Improving Transient Stability Assessment by Installing Super Capacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism," hlm. 5.
- [4] D. Z. Ariandana, A. Priyadi, dan D. A. Asfani, "Optimasi Capacitor Energy Storage (CES) Menggunakan Differential Evolution Algorithm (DEA) untuk Kestabilan Transien Multimesin Berdasarkan Fungsi Energy," 2014.
- [5] "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, hlm. 1387–1401, Agu 2004.
- [6] J. D. Glover, M. S. Sarma, dan T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, 4 ed. CL Engineering, 2007.
- [7] S. Wang, T. Wei, dan Z. Qi, "Supercapacitor Energy Storage Technology and its Application in Renewable Energy Power Generation System," dalam *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*, D. Y. Goswami dan Y. Zhao, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, hlm. 2805–2809.
- [8] R. J. Abraham, D. Das, dan A. Patra, "Effect of capacitive energy storage on automatic generation control," dalam *2005 International Power Engineering Conference*, Singapore, 2005, hlm. 1070-1074 Vol. 2.
- [9] R. Anand dan V. Balaji, "Power Flow Analysis of Simulink IEEE 57 Bus Test System Model using PSAT," *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 8, no. 23, Sep 2015.
- [10] J. J. Grainger dan W. D. Stevenson, *Power System Analysis*, 1st ed. McGraw-Hill Education, 1994.

- [11] A. Priyadi *dkk.*, “Comparison of Critical Trajectory Methods for Direct CCT Computation for Transient Stability,” *IEEJ Transactions on Power and Energy*, vol. 130, no. 10, hlm. 870–876, 2010.



## BIOGRAFI PENULIS



**Almira Atha Nurhasyimi**, lahir di Surabaya pada tanggal 29 Mei 1997. Penulis merupakan alumni dari SDN Kalisari I-242, SMPN 6 Surabaya, dan SMAN 5 Surabaya. Pada tahun 2015, penulis melanjutkan studinya di Departemen Teknik Elektro ITS dengan memilih bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama perkuliahan, penulis aktif di organisasi kemahasiswaan HIMATEKTRO ITS sebagai staff Departemen Keprofesian 2016/2017 dan sekretaris Departemen Prokesma 2017/2018.

Selain itu, penulis juga aktif sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST). Untuk menghubungi penulis, dapat melalui alamat email [almiratha@gmail.com](mailto:almiratha@gmail.com).