

TUGAS AKHIR - EE 184801

EFEK PENAMBAHAN SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE TERHADAP NILAI CRITICAL CLEARING TIME PADA SISTEM MULTIMESIN DENGAN DAMPING BERDASARKAN METODE MODIFIED LOSING SYNCHRONISM

Nazila Iyyaya Fariha NRP 07111640000042

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

DEPATERMEN TEKNIK ELEKTRO Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas Institut Teknologi Sepuluh Nopember



TUGAS AKHIR - EE 184801

EFEK PENAMBAHAN SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE TERHADAP NILAI CRITICAL CLEARING TIME PADA SISTEM MULTIMESIN DENGAN DAMPING BERDASARKAN METODE MODIFIED LOSING SYNCHRONISM

Nazila Iyyaya Fariha NRP 07111640000042

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

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



FINAL PROJECT - EE 184801

EFFECT OF SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE ADDITION TO THE VALUE OF CRITICAL CLEARING TIME ON MULTIMACHINE SYSTEM WITH DAMPING BASED ON MODIFIED LOSING SYNCHRONISM METHOD

Nazila Iyyaya Fariha NRP 07111640000042

Supervisor(s) Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc, Ph.D

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT Faculty of Intelligent Electrical and Informatics Technology Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya 2020

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul "Efek Penambahan Supercapacitor Energy Storage Terhadap Nilai Critical Clearing Time Pada Sistem Multimesin Dengan Damping Berdasarkan Metode Modified Losing Synchronism" 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, Juli 2020

Nazila Iyyaya Fariha NRP. 0711 16 4000 0042

EFEK PENAMBAHAN SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE TERHADAP NILAI CRITICAL CLEARING TIME PADA SISTEM MULTIMESIN DENGAN DAMPING BERDASARKAN METODE MODIFIED LOSING SYNCHRONISM

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng. Ardyono Privadi, ST., M.Eng NIP. 197309271998031004

> SURABAYA JULI, 2020

EFEK PENAMBAHAN SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE TERHADAP NILAI CRITICAL CLEARING TIME PADA SISTEM MULTIMESIN DENGAN DAMPING BERDASARKAN METODE MODIFIED LOSING SYNCHRONISM

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik

Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing II

13-Jul-2020 Vita Lystianingrum Budiharto Putri, ST., M.Sc, Ph.D NIP. 198208292006042001

> SURABAYA JULI, 2020

EFEK PENAMBAHAN SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE TERHADAP NILAI CRITICAL CLEARING TIME PADA SISTEM MULTIMESIN DENGAN DAMPING BERDASARKAN METODE MODIFIED LOSING SYNCHRONISM

Nama Mahasiswa : Nazila Iyyaya Fariha Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Tujuan utama dari studi kestabilan transien adalah untuk memastikan bahwa sistem dapat mempertahankan sinkronisasinya pada kondisi transien setelah terjadinya gangguan besar secara tiba-tiba. Salah satu metode untuk mengevaluasi kestabilan transien suatu sistem adalah dengan metode critical trajectory. Berdasarkan metode critical trajectory akan diperoleh nilai critical clearing time (CCT) dengan mempertimbangkan pemasangan Supercapacitor Energy Storage (SCES) pada bus generator, damping, Automatic Voltage Regulator (AVR) dan governor pada sistem. Damper winding merupakan belitan yang terdapat pada bagian rotor mesin yang berfungsi untuk meredam osilasi pada saat kondisi unstable steady state sehingga sistem bisa lebih lama mempertahankan kestabilannya, sedangkan SCES merupakan salah satu alat penyimpan energi listrik yang dapat menyimpan dan menyuplai listrik dalam jumlah besar secara cepat sehingga dapat dijadikan solusi untuk memperbaiki nilai CCT. Oleh karena itu pada penelitian ini akan membahas mengenai efek penambahan SCES terhadap nilai CCT pada sistem *multimachine* yang terhubung *infinite bus* dengan adanya *damping*. Selain itu akan digunakan metode critical trajectory berdasarkan modified losing synchronism untuk mendapatkan nilai CCT.

Kata kunci: Kestabilan Transien, Critical Clearing Time (CCT), Critical Trajectory, Modified Losing Synchronism, Damper Winding, Multimesin, Supercapacitor Energy Storage (SCES)

EFFECT OF SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE ADDITION TO THE VALUE OF CRITICAL CLEARING TIME ON MULTIMACHINE SYSTEM WITH DAMPING BASED ON MODIFIED LOSING SYNCHRONISM METHOD

Student Name	: Nazila Iyyaya Fariha
Supervisor I	: Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng
Supervisor II	: Vita Lystianingrum B. Putri, ST., M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

The main objective of transient stability study is to ensure that system can maintain its synchronization under transient conditions after a sudden major disturbance. One method for evaluating the transient stability of a system is the critical trajectory method. Based on the critical trajectory method, the critical clearing time (CCT) value will be obtained by considering the installation of Supercapacitor Energy Storage (SCES) on the bus generator, damping, Automatic Voltage Regulator (AVR) and governor on the system. Damper winding is a winding placed in the engine rotor which serves to dampen oscillations during unstabel steady state conditions so that the system can maintain its stability longer, while SCES is one of the electrical energy storage device that can store and supply large amounts of electricity quickly so that it can be used as a solution to improve the value of CCT. Therefore this research will discuss the effect of adding SCES to CCT value on multimachine systems connected to infinite bus in the presence of damping. In addition, the critical trajectory method based on modified losing synchronism will be used to get the CCT value.

Keywords: Transient Stability, Critical Clearing Time (CCT), Critical Trajectory, Modified Losing Synchronism, Damper Winding, Multimesin, Supercapacitor Energy Storage (SCES)

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 "Efek Penambahan Supercapacitor Energy Storage Terhadap Nilai Critical Clearing Time Pada Sistem Multimesin Dengan Damping Berdasarkan Metode Modified Losing Synchronism".

Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

- 1. Segenap keluarga, terutama kedua orang tua, serta adik-adik yang telah banyak memberikan perhatian serta dukungan baik dalam doa maupun semangatnya.
- 2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng dan Ibu Vita Lystianingrum Budiharto Putri, 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.
- 3. Teman-teman e56 yang telah menemani dan berjuang bersama selama perkuliahan.
- 4. Rafin dan Risqiya sebagai rekan satu topik transien yang selama ini sudah berjuang bersama serta seluruh asisten LIPIST B-204 dengan segala cerita dan humornya.
- 5. Mbak Talitha selaku mentor yang senantiasa membimbing, mengarahkan dan sedia membagi ilmu pengetahuannya pada riset ini.
- 6. Penulis juga berterima kasih pada pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas dukungan, ilmu, bantuan, dan doa yang telah diberikan selama ini.

Penulis menyadari masih banyak kesalahan pada penyusunan penelitian, penulis mengharapkan adanya saran dan kritik yang membangun untuk menyempurnakan penelitian ini.

Surabaya, Juli 2020

Penulis,

DAFTAR ISI

HAL	AMAN JUDUL	
PER	NYATAAN KEASLIAN	
LEM	IBAR PENGESAHAN	
ABS	ГКАК	. i
ABS	ТКАСТ	iii
KAT	A PENGANTAR	.v
DAF	TAR ISI	/ii
DAF	TAR GAMBAR	xi
DAF	TAR TABEL x	iii
BAB	1 PENDAHULUAN	.1
1.1	Latar Belakang	.1
1.2	Perumusan Masalah	.2
1.3	Batasan Masalah	.2
1.4	Tujuan	.3
1.5	Metodologi	.3
1.6	Sistematika Penulisan	.4
1.7	Relevansi	.5
BAB	2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	.7
2.1	Tinjauan Pustaka	.7
2.2	Dasar Teori	.8
2.2.1	Kestabilan Sistem	8
2.2.2	Klasifikasi Kestabilan	9
2.2.3	Kestabilan Transien	12
2.2.4	Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan	13
2.2.5	Critical Clearing Time (CCT)	16
2.2.6	Kumparan Peredam (Damper Winding)	18
2.2.7	Supercapacitor Energy Storage (SCES)	19
BAB	3 PEMODELAN SISTEM	21
3.1	Power Flow (Aliran Daya)	21
3.2	Perhitungan Tegangan Internal dan Sudut Daya	26
3.3	Reduksi Matriks	26
3.4	Pemodelan Sistem	27
3.5	Pemodelan Kontroler	30
3.5.1	Pemodelan AVR	31
3.5.2	Pemodelan Governor	32
3.6	Metode Runge-Kutta orde ke-4	33
3.7	Perumusan Masalah	33

3.6.1 Modifikasi Persamaan Trapezoidal	35
3.6.2 Least Square Minimization	36
3.6.3 Metode Newton Raphson	37
3.6.4 Matriks Jacobian	38
3.8 Modifikasi Sistem dengan Penambahan SCES	
3.9 Metode Pengerjaan	41
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	45
4.1 Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem Fouad dan An	nderson 2-
machine 9-bus yang Terhubung Infinite Bus dengan Dar	nping dan
Mempertimbangkan Kontroler	45
4.1.1 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sist	em Fouad
dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa Supercapacito	or Energy
Storage (SCES)	48
4.1.2 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sist	em Fouad
dan Anderson 2-machine 9-bus dengan Supercapacity	or Energy
Storage (SCES)	51
4.1.3 Analisis Lokasi Peletakan Supercapacitor Energy Storag	ge (SCES)
pada Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus	58
4.1.4 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sist	em Fouad
dan Anderson 2-machine 9-bus dengan Pe	nambahan
Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 – 0,5 p.u di	tiap Titik
Gangguan Bus Generator 2	59
4.2 <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada Sistem IEEE 6-mach	ine 57-bus
yang Terhubung <i>Infinite Bus</i> dengan <i>Damp</i>	<i>ing</i> dan
Mempertimbangkan Kontroler	60
4.2.1 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada sister	n IEEE 6-
machine 57-bus tanpa Supercapacitor Energy Storage (SCES).68
4.2.2 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sister	n IEEE 6-
machine 57-bus dengan Supercapacitor Energy Storag	ge (SCES)
	71
4.2.3 Analisis Lokasi Peletakan Supercapacitor Energy Stora	ge (SCES)
pada Sistem IEEE 6-machine 57-bus	
4.2.4 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sister	m IEEE 6-
machine 57-bus dengan Penambahan Supercapacito	or Energy
Storage (SCES) $0, 1 - 0, 5$ p.u di tiap Titik Gangguan Bus	Generator
4.3 Perbandingan Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem	Fouad dan
Anderson 2-machine 9-bus tanpa Damping dan dengan	Damping
yang Terhubung <i>Infinite Bus</i> serta mempertimbangkan Ko	ontroler95

4.4	Perbandingan Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem IEE	EE 6-
	machine 57-bus tanpa Damping dan dengan Damping	yang
	Terhubung Infinite Bus serta mempertimbangkan Kontroler	96
BAE	3 5 PENUTUP	99
5.1	Kesimpulan	99
5.2	Saran	99
DAF	FTAR PUSTAKA	101
BIO	GRAFI PENULIS	103
LAN	MPIRAN	105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi Kestabilan Sistem
Gambar 2.2	Respon sudut rotor terhadap gangguan transien
Gambar 2.3	Lintasan kritis pada sistem <i>single machine</i> yang terhubung
	pada sistem infinite bus dengan penambahan damping 17
Gambar 2.4	Penggambaran Sederhana Rotor Dua Kutub Menonjol
	Dengan Damper Winding 18
Gambar 3.1	Generator sinkron dengan AVR dan governor terhubung
	infinite bus
Gambar 3.2	Rangkaian ekuivalen sistem sebelum terjadi gangguan 28
Gambar 3.3	Rangkaian ekuivalen sistem setelah terjadi gangguan di
	saluran transmisi ke-2
Gambar 3.4	Rangkaian ekuivalen sistem setelah gangguan di saluran
	transmisi ke-2 dihilangkan
Gambar 3.5	Blok diagram sistem AVR
Gambar 3.6	Blok diagram sistem <i>governor</i>
Gambar 3.7	Modifikasi Trapezoidal
Gambar 3.8	Diagram alir untuk memperoleh nilai CCT sistem tanpa
	SCES
Gambar 3.9	Diagram alir untuk memperoleh nilai CCT sistem dengan
	SCES
Gambar 4.1	Single Line Diagram sistem Fouad dan Anderson 2-
	machine 9-bus terhubung infinite bus
Gambar 4.2	Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem
	Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa SCES pada
	bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik A 50
Gambar 4.3	Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem
	Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan SCES 0,1
	p.u pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik A
Gambar 4.4	Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem
	Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan SCES 0,1
	p.u pada bus generator 3 saat terjadi gangguan di titik A
Gambar 4.5	Single Line Diagram sistem IEEE 6-machine 57-bus
	terhubung infinite bus

Gambar 4.6 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem
IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 2
saat terjadi gangguan di titik E70
Gambar 4.7 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem
IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 2
saat terjadi gangguan di titik E74
Gambar 4.8 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem
IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 3
saat terjadi gangguan di titik E77
Gambar 4.9 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem
IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 4
saat terjadi gangguan di titik E81
Gambar 4.10 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk
sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus
generator 5 saat terjadi gangguan di titik E84
Gambar 4.11 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk
sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus
generator 6 saat terjadi gangguan di titik E88
Gambar 4.12 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk
sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus
generator 7 saat terjadi gangguan di titik E91

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Waktu pemutusan relay pengaman17
Tabel 4.1	Data saluran transmisi sistem Fouad dan Anderson 2-machine
	9-bus
Tabel 4.2	Data bus sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus 47
Tabel 4.3	Hasil simulasi power flow untuk generator
Tabel 4.4	Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa
	SCES
Tabel 4.5	Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus
	dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 2 52
Tabel 4.6	Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa
	SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 2 53
Tabel 4.7	Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus
	dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 355
Tabel 4.8	Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa
	SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 3 56
Tabel 4.9	Rata-rata nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 2-
	machine 9-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus
	generator
Tabel 4.1	0 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus
	dengan SCES 0,1 p.u - 0,5 p.u di tiap titik gangguan 59
Tabel 4.1	1 Data saluran transmisi sistem IEEE 6-machine 57-bus 61
Tabel 4.1	2 Data bus sistem IEEE 6-machine 57-bus
Tabel 4.1	3 Hasil simulasi <i>power flow</i> untuk generator
Tabel 4.1	4 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES 68
Tabel 4.1	5 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1
	p.u pada bus generator 272
Tabel 4.1	6 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan
	dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 273
Tabel 4.1	7 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1
	p.u pada bus generator 376
Tabel 4.1	8 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan
	dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 376
Tabel 4.1	9 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1
	p.u pada bus generator 479

Tabel 4.20 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan
dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 480
Tabel 4.21 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1
p.u pada bus generator 583
Tabel 4.22 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan
dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 5
Tabel 4.23 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1
p.u pada bus generator 686
Tabel 4.24 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan
dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 6
Tabel 4.25 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1
p.u pada bus generator 790
Tabel 4.26 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan
dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 790
Tabel 4.27 Rata-rata nilai CCT untuk sistem IEEE 6-machine 57-bus
tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator
Tabel 4.28 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1
p.u - 0,5 p.u di tiap titik gangguan95
Tabel 4.29 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus
tanpa dan dengan <i>damping</i> 96
Tabel 4.30 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa dan dengan
damping97

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kestabilan merupakan suatu kemampuan dari sistem untuk melawan gangguan yang terjadi dan berusaha mengembalikan ke keadaan normal. Kestabilan sistem tenaga menjadi salah satu hal paling penting dalam operasi sistem. Hal ini dikarenakan kestabilan sistem dapat menjadi penyebab utama *blackout* pada sistem tenaga. Kestabilan transien adalah kemampuan mesin-mesin sinkron yang saling terinterkoneksi untuk mempertahankan sinkronisasi saat terkena gangguan transien. Pada sistem yang saling interkoneksi, frekuensi sistem dan kecepatan putar rotor pada mesin sinkron adalah sama.

Adanya gangguan akan menyebabkan pergeseran sudut rotor tergantung dari besarnya gangguan yang terjadi. Gangguan merupakan suatu hal yang tidak bisa dihindari ketika suatu sistem kelistrikan beroperasi apalagi tanpa adanya pengaman yang sesuai dari berbagai macam gangguan. Ketika terjadi gangguan seperti perubahan beban yang mengakibatkan tidak terduga. dapat sistem berusaha untuk mempertahankan kondisi pasokan listrik yang sesuai dengan permintaan. Hal tersebut bisa membebani pekerjaan dari pembangkit yang lain yang bekerja paralel bersama, bahkan belum menjamin seluruh pembangkit bisa mempertahankan sinkronisasinya agar tidak terlepas dari sistem, sehingga perlu ditentukannya waktu kritis pemutusan / Critical Clearing *Time* (CCT). CCT merupakan waktu kritis pemutusan vang diperbolehkan untuk menghilangkan gangguan. 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.

Kita dapat menambahkan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada sistem untuk memperbaiki nilai CCT. SCES merupakan alat penyimpan energi listrik dapat menyimpan dan menyuplai listrik dalam jumlah besar secara cepat, sehingga pengaman pada sistem memiliki waktu lebih panjang untuk memutus gangguan dan mampu menjaga kestabilan. Kapasitas dari SCES harus optimal karena harga dan biaya

pemasangan yang mahal. *Damper winding* adalah kumparan pada rotor mesin sinkron yang berfungsi meredam osilasi rotor saat berputar. Dengan adanya *damping* maka sistem akan menjadi lebih stabil. Dalam tugas akhir ini, digunakan metode modifikasi *losing synchronism*, yaitu sebuah metode langsung untuk mendapatkan nilai CCT sehingga dapat dilakukan analisis kestabilan transien dengan adanya penambahan SCES pada bus generator sistem multimesin.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah mengetahui bagaimana pengaruh penambahan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) terhadap nilai *critical clearing time* (CCT) pada sistem multimesin dengan adanya *damping* menggunakan metode *critical trajectory* berdasarkan *modified losing synchronism*. Pada sistem multimesin tersebut sudah terdapat belitan peredam (*damper winding*) yang membuat sistem lebih stabil sehingga dengan adanya penambahan SCES seharusnya sistem menjadi lebih stabil setelah adanya gangguan dan memperpanjang waktu pemutusan.

Pada penelitian ini diasumsikan setiap saluran transmisi terdiri dari *double circuit*, dan gangguan tiga fasa terjadi pada salah satu saluran. Setelah beberapa saat, gangguan dihilangkan dengan membuka saluran yang mengalami gangguan.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian akan dibatasi oleh hal-hal di bawah ini :

- 1. Simulasi menggunakan software MATLAB R2016b
- 2. Simulasi dilakukan pada sistem modifikasi Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan damping yang terhubung infinite bus dan sistem modifikasi sistem IEEE 6-machine 57-bus bus dengan damping yang terhubung infinite bus.
- 3. Simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan kontroler berupa AVR dan *governor*.
- 4. Nilai CCT sistem diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* berdasarkan *Modified Losing Synchronism*.
- 5. Pada tugas akhir ini nilai koefisien *damping* pada sistem telah ditentukan sebelumnya sebesar 3%.
- 6. Untuk mengetahui pengaruh SCES terhadap nilai CCT, dilakukan peletakan satu buah *Super Capacitor Energy Storage*

(SCES) di bus generator sistem secara bergantian dan dengan menaikkan kapasitas SCES sebesar 0,1-0,5 p.u pada tiap titik gangguan. Pembahasan SCES tidak meliputi karakteristik dari SCES seperti waktu *charging*, waktu *discharging*, *cycle life*, *spesific energy* (Wh/kg), *spesific power* kW/kg), *cycle efficiency* (%), dan harga. Di dalam pembahasan penelitian, SCES diasumsikan dalam keadaan kosong sehingga siap untuk menerima daya mekanis berlebih dari *Critical Generator*.

1.4 Tujuan

Tujuan Tugas Akhir ini adalah memperoleh nilai CCT berdasarkan critical trajectory dengan menggunakan modifikasi hilangnya sinkronisasi (modified losing synchronism) dan mengetahui pengaruh penambahan Supercapacitor Energy Storage (SCES) pada sistem dengan damping yang mempertimbangkan controller berupa AVR dan governor.

1.5 Metodologi

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

1. Studi Literatur

Pada pengerjaan tugas akhir ini hal pertama yang perlu dilakukan adalah mencari literatur yang dapat menunjang proses pengerjaan tugas akhir ini. Studi literatur diperoleh dari berbagai literatur seperti jurnal, *paper*, buku, dan lainnya yang membahas mengenai kestabilan transien, CCT, *Critical Trajectory* berdasarkan *Modified Losing Synchronism, damper winding*, SCES dan referensi terkait lainnya.

2. Pengumpulan Data dan Pemodelan Sistem

Diperlukan pengumpulan data-data yang dibutuhkan. Data yang dibutuhkan berupa data-data terkait jumlah bus pada sistem multimesin, lokasi gangguan, kapasitas generator dan data tiap saluran. Data-data terkait saluran dan bus pada sistem akan digunakan untuk memodelkan program dari sistem. Pada tugas akhir ini, sistem dimodelkan dalam dua kondisi, yaitu sistem sebelum terpasang SCES dan sistem setelah terpasang SCES. Dengan adanya *damping* pada sistem sebenarnya sudah membuat sistem lebih stabil dan meningkatkan nilai CCT. Selain itu pada tugas akhir ini mempertimbangkan adanya *controller* berupa AVR dan governor.

Sistem berupa *SLD Plant* IEEE Fouad Anderson yang dimodelkan menggunakan Matlab R2016B.

3. Simulasi

Program yang dibuat disesuaikan datanya dengan sistem yang akan dianalisis sehingga memudahkan pada saat proses komputasi dan simulasi. Simulasi bertujuan untuk menentukan nilai CCT sistem berdasarkan kondisi sebelum penambahan SCES dan setelah penambahan SCES.

4. Analisis Data

Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan suatu hasil yang akan dianalisis. Data yang dibandingkan dan dianalisis adalah parameter-parameter CCT pada semua sistem yang digunakan sebelum penambahan SCES dan setelah penambahan SCES dengan adanya pengaruh *damping* dan controller berupa AVR dan *governor*, sehingga didapatkan pemodelan yang paling baik.

5. Pembuatan Kesimpulan dan Penulisan Buku Tugas Akhir

Setelah semua tahap selesai dilaksanakan, maka perlu dilakukan pembuatan kesimpulan berdasarkan hasil yang telah diperoleh. Hasil akhir tersebut kemudian ditulis dalam bentuk buku tugas akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

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

Bab I : PENDAHULUAN

Bab I berisi penjelasan umum yang berkaitan dengan penulisan tugas akhir ini berupa latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansinya.

Bab II : TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab II berisi tinjauan pustaka dan dasar teori (teori penunjang) yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini. Tinjauan pustaka membahas mengenai penelitian-penelitian sebelumnya yang terkait, sedangkan dasar teori berisi penjelasan mengenai klasifikasi kestabilan utamanya kestabilan transien, persamaan ayunan (*swing equation*), Critical Clearing Time (CCT), Critical Trajectory, dan Supercapacitor Energy Storage (SCES).

Bab III : PEMODELAN SISTEM

Bab III menjelaskan langkah-langkah untuk memperoleh nilai *Critical Clearing Time* (CCT) menggunakan metode *Critical Trajectory* pada sistem multimesin yang dipengaruhi oleh *damping* dan *controller* yang terhubung pada *infinite bus* serta dilakukan modifikasi pada sistem dengan penambahan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES).

Bab IV : SIMULASI DAN ANALISIS

Bab IV berisi data-data pendukung dari sistem modifikasi Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dan modifikasi sistem IEEE 6-machine 57-bus beserta titk-titk lokasi terjadinya gangguan. Selain itu, bab 4 juga berisi hasil simulasi yang berupa nilai Critical Clearing Time (CCT) untuk sistem modifikasi Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dan modifikasi IEEE 6-machine 57-bus. Hasil simulasi yang diperoleh kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh penambahan Supercapacitor Energy Storage (SCES) pada sistem.

Bab V : PENUTUP

Bab V berisi kesimpulan dari analisis permasalahan dan hasil yang diperoleh pada penelitian ini. Serta saran yang dapat digunakan sebagai masukan untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan topik tugas akhir ini.

1.7 Relevansi

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi pembaca dan peneliti selanjutnya :

- 1. Penelitian ini sebagai pengembangan dari penelitian sebelumnya.
- 2. Penelitian ini sebagai referensi bagi peneliti selanjutnya yang ingin melakukan penelitian mengenai topik serupa.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini berisi tinjauan pustaka yang membahas mengenai penelitian yang dilakukan sebelumnya dan dasar teori yaitu teori-teori yang menunjang penelitian ini.

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan referensi [1] dapat diketahui hasil *Critical Clearing Time* (CCT) menggunakan metode *Critical Trajectory* berdasarkan *Modified Losing Synchronism* dengan pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada sistem Fouad and Anderson 2-machine 9bus yang diletakkan pada bus generator 2 mampu meningkatkan nilai ratarata CCT sistem sebesar 4,97% (0,0135 detik).

Sementara pada referensi [2] penelitian dilakukan pada sistem yang terhubung *infinite bus* dengan *damping* tanpa adanya pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES), nilai *Critical Clearing Time* (CCT) diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* berdasarkan *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP). Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh dari referensi [2] pada sistem Fouad dan Anderson 2-generator 9-bus, dengan adanya penambahan *damping coefficient* sebesar 1% pada setiap generator sinkron mampu meningkatkan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 7,03% (0,021 detik).

Dikarenakan pada referensi [1] sistem yang digunakan merupakan sistem regular yang tidak terhubung dengan *infinite bus* dan tidak adanya pengaruh *damping* pada sistem. Sedangkan pada referensi [2] penelitian tersebut tidak mempertimbangkan adanya SCES dan masih menggunakan berdasarkan metode Critical Trajectory Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP). Maka pada Tugas Akhir ini, dilakukan penelitian terhadap sistem multimesin yang terhubung *infinite bus* dengan adanya pengaruh damping dan controller berupa AVR dan governor dengan mempertimbangkan pemasangan Supercapacitor Energy Storage (SCES) untuk meningkatkan nilai Critical Clearing Time (CCT) berdasarkan metode Modified Losing Synchronism.

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, damper winding (damping)*, serta *Supercapacitor Energy Storage* (SCES).

2.2.1 Kestabilan Sistem

Penggunaan sistem interkoneksi pada jaringan tenaga listrik dapat meningkatkan keandalan dan dapat memperbesar suplai daya yang dihasilkan. Namun, permasalahan yang mungkin muncul pada sistem interkoneksi adalah ketidaksamaan tegangan, frekuensi, dan sudut fasa, sehingga sistem tenaga listrik tidak dapat berjalan serempak atau mengalami ketidakstabilan. Kestabilan sistem merupakan hal yang perlu diperhatikan. Kestabilan sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem untuk mempertahankan keadaan sinkronnya pada saat dan sesudah terjadi gangguan. Definisi ini juga berlaku untuk sistem menginterkoneksi vang beroperasi dengan beberapa generator (multimachine) [3].

Gangguan yang dapat mempengaruhi kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua, yaitu gangguan kecil dan gangguan besar [4]. Gangguan kecil yang terjadi dapat berupa perubahan beban pada sisi beban atau pembangkit secara acak, pelan dan bertingkat. Jatuh (*trip*) yang dialami oleh jaringan tenaga listrik dapat dianggap sebagai gangguan kecil jika pengaruhnya terhadap aliran daya sebelum gangguan pada aliran itu tidak signifikan. Sedangkan gangguan besar sifatnya mendadak dan mampu menghasilkan kejutan tegangan tiba-tiba pada tegangan bus. Gangguan ini harus cepat dihilangkan karena sangat mempengaruhi kestabilan sistem. Gangguan besar dapat berupa gangguan hubung singkat pada sistem transmisi dan pelepasan sumber (generator) dari sistem.

Suatu sistem dikatakan tidak stabil jika tanggapannya terhadap suatu masukan menghasilkan osilasi yang keras atau bergetar pada suatu amplitude/harga tertentu. Sebaliknya suatu sistem disebut stabil jika sistem tersebut akan tetap dalam keadaan diam atau berhenti kecuali jika dirangsang (dieksitasi oleh suatu fungsi masukan) dan akan kembali dalam keadaan diam jika eksitasi tersebut dihilangkan. Terdapat 2 faktor utama dalam masalah stabilitas sistem tenaga listrik, yaitu faktor mekanis dan faktor elektris. Faktor mekanis berupa torsi *input prime mover* dan sumbu beban serta inersia *prime mover*, generator, motor dan sumbu beban. Faktor elektris berupa tegangan *internal* generator dan motor, reaktansi sistem.

2.2.2 Klasifikasi Kestabilan

Terdapat banyak faktor yang dapat mempengaruhi kestabilan suatu sistem tenaga listrik, untuk memudahkan dalam menganalisis permasalahan kesabilan sistem dibutuhkan suatu pengelompokan sistem tenaga listrik. Berdasarkan referensi [5], kestabilan sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga kategori, yaitu kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi dan kestabilan sudut rotor.



Gambar 2. 1 Klasifikasi Kestabilan Sistem [14]

2.2.2.1 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mempertahankan nilai tegangan pada semua bus dari sistem dengan nilai yang dapat diterima (sesuai standar) pada kondisi operasi normal dan setelah mengalami gangguan. Kestabilan sistem tegangan bergantung pada kemampuan untuk mempertahankan kesetimbangan antara supply daya dari pembangkit dan jumlah pembebanannya. Suatu sistem dianggap mengalami ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, penambahan beban atau perubahan pada kondisi sistem yang mengakibatkan penurunan tegangan secara drastis dan tidak terkendali. Gangguan yang biasanya terjadi adalah lepasnya beban secara tiba-tiba ataupun hilangnya sinkron dari salah satu pembangkit. Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan adalah ketidak mampuan sistem tenaga untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif [6].

Kestabilan tegangan dipengaruhi oleh gangguan besar dan gangguan kecil dalam jangka pendek dan jangka panjang. Gangguan tegangan jangka pendek dapat mengakibatkan kedip tegangan (*voltage sags*) dan kenaikan tegangan (*voltage swell*) dengan durasi 0,5 *cycle* sampai 1 menit. Sedangkan gangguan kesabilan tegangan jangka panjang dapat mengakibatkan tegangan lebih (*over voltage*) dan tegangan kurang (*under voltage*) dengan durasi lebih dari 1 menit.

2.2.2.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan ini berkaitan dengan kemampuan dari sistem untuk mempertahankan kestabilan frekuensi akibat gangguan pada sistem yang mengakibatkan ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Pada umumnya masalah kestabilan frekuensi dikaitkan dengan ketidakmampuan dari respon peralatan, koordinasi yang buruk pada peralatan kontrol dan peralatan proteksi, atau kurangnya daya cadangan pembangkitan.

Biasanya gangguan ini berupa perubahan pembangkitan atau beban yang signifikan [7]. *Equilibrium point* (titik keseimbangan) antara suplai daya sistem dan beban harus dipertahankan untuk mencegah sistem mengalami *generator outage*.
Kestabilan frekuensi diklasifikasikan menjadi dua, yaitu jangka panjang dan jangka pendek. Contoh kestabilan frekuensi jangka pendek berupa pembentukan *undergenerated island* dengan pelepasan *underfrequency* yang tidak mencukupi, sehingga frekuensi menurun secara tiba-tiba dan menyebabkan sistem mati total dalam durasi beberapa detik. Sedangkan kestabilan frekuensi jangka panjang disebabkan oleh konrol *governor* yang tidak bekerja ketika terdapat gangguan dengan rentang waktu puluhan detik hingga beberapa menit.

2.2.2.3 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan mesin-mesin sinkron yang yang saling interkoneksi pada sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya. Kestabilan sudut rotor bergantung pada kemampuan sistem untuk mempertahankan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan mekanik pada mesin-mesin tersebut. Faktor mendasar pada kestabilan ini adalah daya *output* dari mesin sinkron berubah-ubah sesuai dengan osilasi rotornya. Ketidakstabilan tersebut dapat mengakibatkan berubahnya kecepatan sudut ayunan mesin sinkron sehingga terjadi hilangnya sinkronisasi antar mesin [6].

Pada saat sistem mengalami kondisi *steady state* terdapat keseimbangan antara torsi elektrik dan torsi mekanik dari masing masing generator dengan kecepatan konstan. Jika sistem mengalami gangguan, titik keseimbangannya akan berubah dan mengakibatkan percepatan atau perlambatan sudut rotor. Ketika salah satu generator berputar lebih cepat dari generator yang lain, posisi sudut rotor relatif terhadap generator yang lebih lambat akan meningkat. Perbedaan sudut yang dihasilkan antara mesin yang lebih lambat dengan mesin yang lebih cepat ini bergantung pada hubungan daya dan sudut rotor.

Kestabilan sudut rotor secara umum dibedakan menjadi dua yaitu, akibat gangguan kecil dan gangguan besar atau kestabilan transien. Ketidakstabilan sudut rotor akibat gangguan kecil biasanya terjadi dalam waktu 10-20 detik setelah gangguan dan tergantung pada operasi awal sistem. Gangguan ini dapat terjadi akibat kurangnya torsi sinkronisasi dan kurangnya torsi *damping*. Sedangkan gangguan besar pada kestabilan sudut rotor biasanya diakibatkan oleh hubung singkat.

2.2.3 Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya ketika mengalami gangguan transien. Gangguan transien merupakan gangguan besar yang bersifat tiba-tiba selama periode satu ayunan pertama. Respon sistem yang dihasilkan berupa penyimpangan yang besar dari sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh hubungan nonlinier sudut rotor terhadap daya [6]. Kestabilan diklasifikasikan secara sistematis dengan didasarkan atas beberapa pertimbangan yaitu [3] :

- 1. Ukuran dari gangguan
- 2. Pemodelan yang tepat dan analisis gangguan yang spesifik
- 3. Rentang waktu saat gangguan berlangsung
- 4. Parameter sistem yang paling berpengaruh

Studi kestabilan transien perlu dilakukan karena suatu sistem dapat dikatakan stabil pada kestabilan steady state, namun belum tentu stabil pada kestabilan transien. Sehingga perlu dilakukan analisis untuk mengetahui apakah sistem dapat bertahan ketika dan setelah terjadi gangguan transien. Gangguan kestabilan transien dapat terjadi karena beberapa faktor yaitu beban lebih akibat lepasnya satu generator dari sistem, hubung singkat (*short circuit*), pelepasan beban yang mendadak dan *starting* pada motor.



Gambar 2. 2 Respon sudut rotor terhadap gangguan transien [6]

Gambar 2.1 mengilustrasikan perilaku mesin sinkron pada kondisi stabil dan tidak stabil. Gambar tersebut menunjukkan respon sudut rotor pada satu kasus stabil dan dua kasus tidak stabil. Pada kasus pertama, sudut rotor meningkat sampai mencapai nilai maksimum, kemudian berosilasi dengan mengurangi amplitudonya hingga mencapai kondisi stabil. Pada kasus kedua, sudut rotor terus meningkat hingga sistem kehilangan sinkronisasi. Kondisi tersebut disebut sebagai *first-swing instability*. Pada kasus ketiga, sistem tetap stabil pada ayunan pertama tetapi menjadi tidak stabil karena adanya peningkatan osilasi ketika akan mencapai kondisi akhir. Bentuk ketidakstabilan ini umumnya terjadi ketika kondisi *postfault steady-state* yang bukan merupakan akibat dari gangguan transien, melainkan akibat dari gangguan dinamik.

2.2.4 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan [8]

Persamaan gerakan rotor pada sebuah unit pembangkit yang terdiri atas generator sinkron tiga fasa dan pengerak utamanya dapat dituliskan dalam persamaan berikut :

$$J a_m(t) = T_a(t) = T_m(t) - T_e(t)$$
(2.1)

Keterangan:

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

- α_m = percepatan sudut rotor (rad/s²)
- 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)

Juga, persamaan percepatan sudut rotor sebagai berikut :

$$\alpha_m(t) = \frac{d\omega_m(t)}{dt} = \frac{d^2\theta_m(t)}{dt^2}$$
(2.2)
$$\omega_m(t) = \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$
(2.3)

 $\omega_m(t) = \frac{\omega_m(t)}{dt}$

Keterangan:

 ω_m = kecepatan sudut rotor (rad/s)

 θ_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 α_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 α_m akan bernilai postif. 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

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

Keterangan:

 ω_{msyn} = kecepatan sudut sinkron pada rotor (rad/s)

 δ_m = posisi sudut rotor terhadap sumbu referensi putaran sinkron (rad) Persamaan (2.2) dan (2.4) disubtitusikan ke dalam persamaan (2.1), dapat ditulis menjadi

$$J\frac{d^{2}\theta_{m}(t)}{dt^{2}} = J\frac{d^{2}\delta_{m}(t)}{dt^{2}} = T_{m}(t) - T_{e}(t) = T_{a}(t)$$
(2.5)

Untuk memudahkan perhitungan, satuan yang digunakan diubah dalam per-unit (p.u.). Dengan mengalikan persamaan (2.5) dengan $\omega_m(t)$ dan membaginya dengan S_{rated} maka persamaan *rating* daya semu (VA) tiga fasa dari generator menjadi

$$J \frac{\omega_m(t)}{s_{rated}} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = \frac{\omega_m(t) T_a(t)}{s_{rated}} = \frac{\omega_m(t) T_m(t) - \omega_m(t) T_e(t)}{s_{rated}}$$
(2.6)

$$J \frac{\omega_m(t)}{s_{rated}} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = \frac{P_a(t)}{s_{rated}} = \frac{P_m(t) - P_e(t)}{s_{rated}}$$
(2.7)

$$J \frac{\omega_m(t)}{s_{rated}} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = P_{a \, p.u.}(t) = P_{m \, p.u}(t) - P_{e \, p.u.}(t)$$
(2.8)

Keterangan:

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

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

 $P_{a p.u.}(t) =$ 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*.

$$H = \frac{\text{jumlah energi kinetik yang tersimpan dalam kecepatan sinkron}}{\text{rating VA mesin}}$$
$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{msyn}^2}{s_{rated}} \text{ (joules/VA atau p.u detik)}$$
(2.9)

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 (2.8) dan (2.9) diperoleh persamaan

$$2 H \frac{\omega_m(t)}{\omega_{msyn}^2} \frac{d^2 \delta_m(t)}{dt^2} = P_{m \, p.u}(t) - P_{e \, p.u.}(t) = P_{a \, p.u.}(t)$$
(2.10)

Kecepatan sudut rotor dalam satuan p.u didefinisikan sebagai berikut :

$$\omega_{p.u.}(t) = \frac{\omega_m(t)}{\omega_{msyn}} \tag{2.11}$$

Dengan mensubtitusikan persamaan (2.11) maka persamaan (2.10) dapat ditulis menjadi :

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

Untuk sebuah generator sinkron dengan jumlah kutub p, dengan percepatan sudut elektris α , frekuensi radian elektris ω dan sudut daya δ

$$\alpha(t) = \frac{P}{2}\alpha_m(t) \tag{2.13}$$

$$\omega(t) = \frac{P}{2}\omega_m(t) \tag{2.14}$$

$$\delta(t) = \frac{P}{2}\delta_m(t) \tag{2.15}$$

Demikian pula, frekuensi radian sinkron elekrisnya

$$\omega_{syn} = \frac{P}{2} \omega_{msyn} \tag{2.16}$$

$$\omega_{p.u(t)} = \frac{\omega(t)}{\omega_{syn}} = \frac{\frac{2}{p}\omega(t)}{\frac{2}{p}\omega_{syn}} = \frac{\omega_m(t)}{\omega_{syn}}$$
(2.17)

Dengan menubtitusikan persamaaan (2.15), (2.16) (2.17), maka persamaan (2.12) dapat dituliskan sebagai berikut

$$\frac{2H}{\omega_{syn}}\omega_{p.u.}(t) \ \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = P_{m\,p.u}(t) - P_{e\,p.u.}(t) = P_{a\,p.u.}(t)$$
(2.18)

Persamaan (2.18) dapat dimodifikasi dengan menambahkan parameter yang mewakili torsi *damping* pada saat generator menyimpang dari kecepatan sinkronnya, dengan nilai yang sebanding dengan deviasi kecepatannya

$$\frac{{}^{2}H}{\omega_{syn}}\omega_{p.u.}(t)\frac{d^{2}\delta(t)}{dt^{2}} = P_{m\,p.u}(t) - P_{e\,p.u.}(t) - \frac{D}{\omega_{syn}}\frac{d\delta(t)}{dt}$$
$$= P_{a\,p.u.}(t)$$
(2.19)

Dimana D bernilai nol atau bernilai positif yang relatif kecil antara 0 dan 2 pada khususnya. Nilai D diperoleh dari pembagian daya per unit dengan deviasi kecepatan per unit. Persamaan (2.19) disebut sebagai persamaan ayunan per unit, merupakan persamaan mendasar yang menentukan dinamikan rotor dalam studi stabilitas transien. Karena $P_{e n.u.}(t)$ merupakan persamaan non linier dari δ , maka persamaan (2.19) juga bersifat non linier yang disebabkan oleh $\omega_{p.u.}(t)$. Namun, dalam paktiknya kecepatan rotor tidak berubah secara signifikan dibandingkan kecepatan sinkronnya pada saat kondisi transien. Sehingga pada persamaan (2.19) sering diasumsikan $\omega_{n.u.}(t)$ bernilai $\simeq 1.0$.

Persamaan (2.19) merupakan persamaan diferensial orde kedua yang dapat dituliskan sebagai dua persamaan diferensial order pertama. Menurunkan persamaan (2.4), lalu mensbtitusikannya dengan persamaan (2.3) dan (2.14) kedalam persamaan (2.16), menghasilkan

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) - \omega_{syn} \tag{2.20}$$

Dengan mensubtitusikan persamaan persamaan (2.20), maka persamaan (2.19) dapat dituliskan menjadi

$$\frac{2H}{\omega_{syn}}\omega_{p.u.}(t)\frac{d\omega(t)}{dt} = P_{m\,p.u}(t) - P_{e\,p.u.}(t) - \frac{D}{\omega_{syn}}\frac{d\delta(t)}{dt}$$
$$= P_{a\,p.u.}(t)$$
(2.21)

Persamaan (2.20) dan persamaan (2.21) merupakan dua persamaan diferensial orde pertama.

2.2.5 Critical Clearing Time (CCT)

Critical Clearing Time (CCT) merupakan waktu pemutusan kritis yang akan menentukan apakah sistem tenaga listrik akan dapat kembali ke kondisi stabil maupun tidak stabil. Jika suatu sistem tenaga listrik mengalami gangguan baik itu gangguan besar maupun kecil maka area yang terjadi gangguan harus segera diisolasi dan pengisolasian dapat dilakukan dengan cara pemutusan saluran melalui *Circuit Breaker* (CB) saluran maupun pelepasan generator dari sistem melalui *circuit breaker* generator. Pemutusan yang dilakukan oleh *circuit breaker* harus kurang dari waktu pemutus kritisnya untuk dapat memastikan sistem dapat kembali ke kondisi stabil. Jika gangguan diputus lebih dari waktu kritisnya, maka sistem akan berada dalam keadaan tidak stabil. CB bekerja dengan koordinasi dari *relay* pengaman yang mengirimkan sinyal pada CB untuk melakukan pemutusan saluran dalam waktu kurang dari 0,3 detik. Dibawah ini merupakan waktu operasi dari relay [9]:

Polou Operation	Type of Relay		
Relay Operation	Static	Electromechanical	
Circuit breaker opening time	0,08 s	0,08 s	
Relay overtravel	0,00 s	0,10 s	
Relay tolerance and setting errors	0,12 s	0,12 s	
Total CTI	0,2 s	0,3 s	

Tabel 2	2.1 V	Vaktu	pemutusan	relay	pengaman
---------	-------	-------	-----------	-------	----------

Waktu operasi dari data tersebut tidak mempertimbangkan nilai CCT, sehingga tidak menjamin sistem akan kembali pada kondisi stabil. Maka, analisis pada CCT dilakukan untuk memperbaiki keandalan suatu sistem tenaga listrik.

2.2.5.1 Critical Trajectory



Gambar 2.3 Lintasan kritis pada sistem *single machine* yang terhubung pada sistem *infinite bus* dengan penambahan *damping* [10]

Lintasan kritis merupakan sekumpulan titik mulai dari *exit* point pada lintasan gangguan atau *initial point* x^0 pada lintasan kritis hingga mencapai titik akhir (*endpoint*) x^{m+1} yang memenuhi kondisi modified losing synchronism [10]. Lintasan 1 merupakan lintasan ketika sistem mengalami gangguan (*fault-on*) hingga gangguan tersebut diputus pada waktu CCT. Lintasan 2 untuk kondisi sistem yang stabil dimana gangguan hilang di titik awal, kemudian mengalami isolasi di sekitar titik ekuilibrium yang stabil sehingga setelah terjadi pemutusan gangguan, sistem kembali beroperasi pada daerah stabilnya yaitu *Stable Equilibrium Point* (SEP). Lintasan 3 merupakan lintasan kritis yang terletak di antara kondisi stabil dan tidak stabil. Pada sistem *single machine*, lintasan tersebut mencapai *Unstable Equilibrium Point* (UEP) namun tidak untuk sistem multimesin. Pada sistem multimesin memiliki kesulitan untuk mendapatkan UEP. Lintasan 4 adalah lintasan saat gangguan terlambat diputus sehingga sistem kehilangan kestabilannya. Apabila jumlah mesin yang terhubung ke bus *infinite* lebih dari 1, maka titik kritisnya menjadi CUEP.

Dari lintasan kritis ini dapat diamati kapan sistem msih stabil dan tidak dengan mengamati nilai CCT (*Critical Clearing Time*) yang didapatkan dengan cepat, karena apabila menggunakan metode konvensional yaitu TDS (*Time Domain Simulation*) biasanya tidak akurat dan memakan waktu lama dalam perhitungannya.

2.2.6 Kumparan Peredam (Damper Winding)

Damper winding atau kumparan peredam merupakan suatu batangan khusus yang terbuat dari plat besi yang diletakkan di slot yang ada pada dinding-dinding kutub rotor dari motor sinkron yang kemudian di-short-kan di setiap ujungnya oleh shorting ring yang besar [11]. Adanya kumparan ini meningkatkan kestabilan sistem tenaga secara keseluruhan dengan mengurangi atau meredam besar nilai daya dan torsi transien. Prinsip kerja kumparan peredam ini secara umum adalah dengan torsi yang dihasilkan pada kumparan peredam mampu meredam osilasi mekanis rotor.



Gambar 2. 4 Penggambaran Sederhana Rotor Dua Kutub Menonjol dengan *Damper Winding* [11]

Untuk mengetahui apa efek dari *damper winding* pada motor sinkron, kita dapat mengamati dua kutub menonjol rotor pada gambar 2.4 Rotor tersebut menunjukkan *damper winding* dengan *shorting bar* di setiap ujung dari kedua kutub rotor yang dihubungkan dengan kabel [11].

2.2.7 Supercapacitor Energy Storage (SCES)

Supercapacitor Energy Storage (SCES) merupakan salah satu sistem penyimpanan energi yang dapat menyimpan dan melepaskan daya listrik. Penyimpan energi ini terdiri atas beberapa kapasitor yang terhubung secara parallel dan dihubungkan pada sistem tenaga [9]. SCES memiliki kerapatan daya (power density) yang tinggi [12]. Sehingga mampu untuk mengelurkan daya dalam jumlah yang besar. Oleh karena itu, SCES memiliki life cycle yang tinggi sebab durasi charge dan discharge hanya ditempuh dalam hitungan detik. Oleh karena itu, SCES dapat digunakan untuk membantu meningkatkan kestabilan transien selama periode transien saat sistem mengalami gangguan.

Pada penelitian ini SCES digunakan sebagai penyimpan energi pada sistem apabila terjadi gangguan. SCES akan mengisi kembali tegangannya (*charging*) saat terjadi pelepasan beban secara tiba-tiba dan ketika sistem kembali pada kondisi *steady state*, energi berlebih yang diserap kemudian dilepaskan dan tegangan kapasitor kembali ke nilai normalnya [13].

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3 PEMODELAN SISTEM

Pada bab ini berisi pemodelan sistem dan perhitungan critical trajectory. Metode *critical trajectory* memiliki beberapa langkah persamaan yang harus dipenuhi dan dilakukan untuk mendapatkan nilai CCT-nya. Langkah-langkah tersebut akan dibahas di bab ini untuk menunjukkan perhitungan untuk mendapatkan nilai CCT.

3.1 *Power Flow* (Aliran Daya)

Analisis *power flow* atau aliran daya memiliki peran yang sangat penting dalam melakukan perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga. Disebut power flow karena beban yang menempel pada sistem bersifat statis dan terdapat daya yang mengalir pada saluran transmisi sehingga lebih cenderung disebut sebagai power flow daripada load flow. Dalam studi aliran daya terdapat analisis tegangan sinusoidal steady state, daya aktif dan reaktif yang dihasilkan maupun diserap generator, dan losses di saluran. Dengan analisis aliran daya, magnitud dan sudut tegangan dapat diketahui pada tiap bus ketika dalam kondisi steady state. Hal tersebut sangat penting karena data magnitud tegangan bus diperlukan untuk menganalisis sistem pada kondisi waktu tertentu. Karena magnitud tegangan dan sudutnya dapat dihitung menggunakan perhitungan aliran daya, maka daya aktif dan reaktif pada sistem juga dapat dihitung. Begitupula dengan perbedaan aliran daya dari sisi pengirim dan sisi penerima, dan juga kerugian pada saluran tertentu. Kemudian, dari data saluran kita juga dapat melihat kondisi ketika beban mengalami kelebihan maupun kekurangan supply daya [14].

Untuk dapat merumuskan daya aktif dan daya reaktif yang memasuki bus, sebelumnya perlu didefinisikan hal-hal berikut. Misal tegangan pada bus ith dilambangkan dengan :

Bentuk rectangular :

$$V_i = |V_i|(\cos\delta_i + j\sin\delta_i) \tag{3.1}$$

Bentuk *polar* :

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \tag{3.2}$$

Nilai identitas Euler :

$$V_i = |V_i| e^{\delta_i} \tag{3.3}$$

Nilai admitansi bus I terhadap dirinya sendiri :

$$Y_{ii} = |Y_{ii}|e^{\theta_{ii}} = |Y_{ii}| \, \angle \theta_{ii} = |Y_{ii}|(\cos \theta_{ii} + j \sin \theta_{ii}) \tag{3.4}$$

Rumus $G_{ii} = |Y_{ii}| \cos \theta_{ii}$ adalah konduktansi dan $B_{ii} = |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$ adalah suseptansi, dimana kita tahu induktansi adalah :

$$Y_{ii} = G_{ii} + B_{ii} \tag{3.5}$$

Demikian pula nilai admitansi antara bus i dan bus j, dapat ditulis sebagai berikut :

$$Y_{ij} = |Y_{ij}|e^{\theta_{ij}} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ii} = |Y_{ij}| (\cos \theta_{ij} + j \sin \theta_{ij})$$
(3.6)

$$Y_{ij} = G_{ij} + B_{ij} \tag{3.7}$$

Misalkan sistem memiliki sejumlah *n* bus. Maka arus yang masuk di bus ke-*i* adalah :

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + Y_{i3}V_3 + \dots + Y_{in}V_n$$
(3.8)

$$I_i = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} Y_{ij} V_i \tag{3.9}$$

Dari persamaan diatas diasumsikan arus yang masuk bus bernilai positif dan arus yang keluar dari bus bernilai negatif. Dengan asumsi tersebut maka daya aktif dan reaktif yang memasuki bus akan mendapatkan asumsi bernilai positif pula. Dan daya total atau daya semu untuk kondisi lagging (arus tertinggal oleh tegangan atau saat beban induktif) pada bus ke- adalah :

$$P_i - jQ_i = V_i^* I_i = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} V_i^* V_j Y_{ij}$$
(3.10)

Dan sebaliknya, daya total untuk kondisi *leading* (arus mendahului tegangan atau saat beban kapasitif) pada bus ke-*i* adalah :

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} V_i^* V_j Y_{ij}$$
(3.11)

Tapi secara umum, sistem kelistrikan memiliki beban induktif dan mengakibatkan sistem berada pada kondisi *lagging*. Maka perumusan daya total dapat diturunkan dari persamaan (3.10) sebagai berikut :

$$P_{i} - jQ_{i} = V_{i}^{*}I_{i} = \sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n} |V_{i}^{*}V_{j}Y_{ij}| \angle (-\delta_{i} + \delta_{j} + \theta_{ij})$$
(3.12)

Persamaan daya aktif dan reaktif di *power flow* dan dituliskan dalam bentuk *polar*, *rectangular*, dan bentuk *hybrid* (gabungan). Bentuk *polar*

biasanya digunakan di metode Newton Raphson dan Fast Decoupled sedangkan *rectangular* digunakan di metode Gauss Seidel.

Berikut persamaan daya reaktifnya :

Bentuk polar :

$$P_{i} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_{i}V_{j}Y_{ij}| \cos(-\delta_{i} + \delta_{j} + \theta_{ij})$$
(3.13)

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos\left(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}\right)$$
(3.14)

Bentuk rectangular :

$$P_i = Real\left\{V_i^* \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} V_j Y_{ij}\right\}$$
(3.15)

Bentuk *hybrid* :

Berdasarkan persamaan (3.13), dapat diturunkan menjadi :

$$P_i = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \cos\left[-\left(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}\right)\right]$$
(3.16)

$$P_{i} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_{i}V_{j}Y_{ij}| \cos(\delta_{i} - \delta_{j} - \theta_{ij})$$
(3.17)

$$P_{i} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_{i}V_{j}Y_{ij}| \cos[(\delta_{i} - \delta_{j}) - \theta_{ij}]$$
(3.18)

$$P_{i} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_{i}V_{j}Y_{ij}| \left[\cos(\delta_{i} - \delta_{j})\cos\theta_{ij} + \sin(\delta_{i} - \delta_{j})\sin\theta_{ij} \right]$$
(3.19)

$$P_{i} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_{i}V_{j}| \left[\cos(\delta_{i} - \delta_{j}) |Y_{ij}| \cos\theta_{ij} + \sin(\delta_{i} - \delta_{j}) |Y_{ij}| \sin\theta_{ij} \right]$$
(3.20)

$$P_{i} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_{i}V_{j}| \left[\cos(\delta_{i} - \delta_{j})G_{ij} + \sin(\delta_{i} - \delta_{j})B_{ij} \right]$$
(3.21)

Dan berikut persamaan daya reaktifnya : Bentuk *polar* :

$$Q_i = -\sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$
(3.22)

$$Q_{i} = -|V_{i}|^{2}B_{ii} - \sum_{i}^{n}\sum_{j}^{n}|V_{i}V_{j}Y_{ij}|\sin(-\delta_{i} + \delta_{j} + \theta_{ij})$$
(3.23)

Bentuk rectangular :

$$Q_i = -Imajiner\left\{V_i^* \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} V_j Y_{ij}\right\}$$
(3.24)

Bentuk *hybrid* :

Berdasarkan persamaan (3.22), dapat diturunkan menjadi :

$$Q_i = -\sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \sin\left[-\left(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}\right)\right]$$
(3.25)

$$Q_i = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$
(3.26)

$$Q_i = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_i V_j Y_{ij}| \sin[(\delta_i - \delta_j) - \theta_{ij}]$$
(3.27)

$$Q_{i} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} \left| V_{i} V_{j} Y_{ij} \right| \left[sin(\delta_{i} - \delta_{j}) cos\theta_{ij} + cos(\delta_{i} - \delta_{j}) sin\theta_{ij} \right]$$
(3.28)

$$Q_{i} = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_{i}V_{j}| \left[sin(\delta_{i} - \delta_{j}) |Y_{ij}| cos\theta_{ij} + cos(\delta_{i} - \delta_{j}) |Y_{ij}| sin\theta_{ij} \right]$$
(3.29)

$$Q_i = \sum_{i}^{n} \sum_{j}^{n} |V_i V_j| \left[\sin(\delta_i - \delta_j) G_{ij} + \cos(\delta_i - \delta_j) B_{ij} \right]$$
(3.30)

Dengan menggunakan deret taylor, maka persamaan (3.13) dan (3.22) dapat diselesaikan. Dimana turunan parsial dari orde lebih dari satu dabaikan. Oleh karena persamaan daya terdiri atas beberapa variabel, maka turunan parsial harus dilakukan terhadap masing-masing variabel. Dalam hal ini variabel tersebut adalah δ dan |V|. Apabila dituliskan dalam bentuk matriks, maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial P_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_2} \\ \frac{\partial Q_2^{(k)}}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_n^{(k)}}{\partial V_n} \\ \end{bmatrix}$$
(3.31)

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

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix}$$
(3.32)

Elemen diagonal dan off-diagonal dari J_1 adalah

$$\frac{\Delta P_i}{\partial \delta_i} = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$
(3.33)

$$\frac{\Delta P_i}{\partial \delta_j} = -\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$
(3.34)

Elemen diagonal dan off-diagonal dari J_2 adalah

$$\frac{\Delta P_i}{\partial V_i} |V_i| = 2|V_i|^2 G_{ii} + \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos\left(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}\right)$$
(3.35)

$$\frac{\Delta P_i}{\partial V_j} |V_j| = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos\left(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}\right)$$
(3.36)

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

$$\frac{\Delta Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$
(3.37)

$$\frac{\Delta Q_i}{\partial \delta_j} = -\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$
(3.38)

Elemen diagonal dan off-diagonal dari J_4 adalah

$$\frac{\Delta Q_i}{\partial V_i} |V_i| = -2|V_i|^2 B_{ii} - \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$
(3.39)

$$\frac{\Delta Q_i}{\partial V_j} |V_j| = -\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})$$
(3.40)

Dari perkalian matriks Jacobian tersebut diperoleh nilai $\Delta \delta_i$ dan $\Delta |Vi|$ 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.

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta \delta_i^{(k)} \tag{3.41}$$

$$|V_i^{(k+1)}| = |V_i^{(k)}| + \Delta |V_i^{(k)}|$$
(3.42)

Keterangan:

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

3.2 Perhitungan Tegangan Internal dan Sudut Daya [14]

Analisis aliran daya menghitung masing-masing tegangan. Tegangan *internal* generator pada umumnya disebut sebagai tegangan *armature* (E_a) harus dihitung dengan

$$E_a = I_a j x'_a + V_{t,cal} \tag{3.43}$$

Dimana I_a injeksi arus pada bus terminal atau juga disebut sebagai arus armature. Karena E_a adalah bilangan kompleks, sudut rotor didapatkan dengan

$$E_a = real_{E_a} + jimag_{E_a} \tag{3.44}$$

$$E_a = |E_a| \angle \delta \tag{3.45}$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{imag_{E_a}}{real_{E_a}} \tag{3.46}$$

3.3 Reduksi Matriks

Reduksi matriks jaringan adalah algoritma berdasarkan sensitivitas matriks yang bertujuan untuk menyederhanakan sistem agar menjadi lebih mudah dan cepat saat dilakukan perhitungan pada step setelahnya. Dimisalkan matriks dari suatu sistem tenaga sebagai berikut :

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \tag{3.47}$$

Dimana :

Ibus: nilai vektor dari arus yang masuk busVbus: nilai vektor dari tegangan bus yang diukur dari simpul/node/bus
yang dijadikan sebagai referensi

*Y*_{bus} : matriks admitansi bus

Ukuran dari *network* atau jaringan sistem dapat direduksi dengan cara menghilangkan bus yang bersifat pasif, yaitu bus yang tidak terkoneksikan dengan beban ataupun generator. Tujuan dilakukannya reduksi ini adalah untuk menyederhanakan sistem sehingga menjadi lebih mudah dan cepat saat melakukan perhitungan pada step setelahnya. Jika jumlah seluruh bus pada sistem yang digunakan adalah n, dan Ik = 0 (maka bus k adalah bus pasif), node k dapat dihilangkan dengan cara

mengganti elemen matriks pada kolom dan baris ke-(*n*-1) menggunakan rumus :

$$Y_{ij}^{(new)} = Y_{ij} - \frac{Y_{ik}Y_{kj}}{Y_{kk}}$$
(3.48)

Untuk i = 1,2,...k-1,k+1,....,n dan j=1,2,...,k-1,k+1,....,n

Dengan cara mengaplikasikan persamaan (3.48) pada seluruh sistem secara berturut-turut, nomor-nomor dari *node* pasif yang diinginkan bisa dieliminasi dengan mudah. Persamaan (3.48) adalah persamaan yang banyak digunakan dalam analisis *power flow* dan analisis kestabilan dinamis, yang bisa dimanfaatkan juga untuk analisis kestabilan transien untuk mencari nilai admitansinya. Persaman tersebut dinamakan dengan persamaan reduksi Krone.

Dalam analisis kestabilan transien, semua bus dieleminasi kecuali bus internal generator lalu bisa didapatkan matriks admitansi Y dari sistem yang telah direduksi sebagai berikut :

$$I = YV \tag{3.49}$$

Dimana

$$I = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nr} \\ Y_{rn} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ V_r \end{bmatrix}$$
(3.50)

Matriks di persamaan (3.50) adalah matriks reduksi Y. Dimensi dari matriks tersebut adalah $(n \times n)$, dimana n jumlah generator. Setelah dilakukan reduksi jaringan, yang tersisa dalam perhitungan selanjutnya adalah bus-bus yang masuk di kondisi batas yang ditentukan dan bus asli yang mengandung komponen beban atau generator. Sistem tersebut dinamakan dengan *equivalents*. Sistem *equivalents* digunakan untuk jaringan yang luas seperti *plant* Jawa-Bali atau sejenisnya. Selain itu sistem *equivalents* juga digunakan untuk mempercepat waktu perhitungan. Karena pada dasarnya, mereduksi sistem besar menjadi sistem kecil yang setara lebih efisien daripada mereduksi sistem besar menjadi sistem *single equivalent* [15].

3.4 Pemodelan Sistem

Berikut merupakan pemodelan sederhana sistem dengan satu generator yang terhubung dengan *infinite* bus dan terdapat tambahan kontroler berupa AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dan *governor* yang menyuplai daya aktif dan daya reaktif melalui saluran transmisi *double* *circuit* (saluran ganda) yang terhubung dengan *bus infinite* sesuai dengan gambar :



Gambar 3. 1 Generator sinkron dengan AVR dan *governor* terhubung *infinite bus* [14]

Sebelum terjadi gangguan, sistem pada Gambar 3.1 dapat diilustrasikan dengan rangkaian sebagai berikut. Gambar 3.2 di bawah ini merupakan rangkaian ekuivalen sistem dua generator sebelum gangguan dimana :

- *E* : tegangan generator
- *Xd* : reaktansi generator
- *Xl* : reaktansi saluran transmisi
- V_t : tegangan terminal generator





Berdasarkan gambar di atas, dapat dirumuskan :

$$E = Ix_d + V_t \tag{3.51}$$

 $V_t = Ix_i + E_b \tag{3.52}$

Dari kedua persamaan di atas apabila disubtitusikan diperoleh : $E = I(x_d + x_l) + E_b$ (3.53)

$$I = \frac{E - E_b}{x_d + x_l} \tag{3.54}$$

Jika reaktansi total $x = x_d + x_l$, persamaan (3.54) menjadi :

$$I = \frac{E - E_b}{x} \tag{3.55}$$

Subtitusikan persamaan (3.55) ke dalam persamaan (3.51) :

$$V_t = E - Ix_d = E - \frac{E - E_b}{x} x_d$$
(3.56)

$$V_t = \frac{Ex_l + E_b \cdot x_d}{x} \tag{3.57}$$

Lalu dimisalkan terjadi gangguan pada saluran transmisi nomor 2 (posisi bawah) dari sistem, berikut penggambarannya :



Gambar 3. 3 Rangkaian ekuivalen sistem setelah terjadi gangguan di saluran transmisi ke-2 [14]

Setelah terjadi gangguan 3 - L - Ground pada saluran transmisi kedua sesuai pada Gambar 3., *circuit breaker* dari sistem akan membuka di kedua sisi (awal dan akhir) saluran transmisi kedua. Maka, pada keadaan setelah gangguan, generator sinkron hanya akan menyuplai daya aktif dan reaktif ke *bus infinite* melalui saluran transmisi *single circuit* (saluran tunggal). Keadaan sistem setelah terjadi gangguan dapat diambarkan sebagai berikut :



Gambar 3. 4 Rangkaian ekuivalen sistem setelah gangguan di saluran transmisi ke-2 dihilangkan [14]

Model sistem multimesin terhubung pada bus *infinite* diartikan sebagai model *xd*' generator yang ditunjukkan oleh dua persamaan diferensial [14]. Persamaan ayunan direpresentasikan oleh persamaan berikut:

$$M_i \dot{\omega}_l = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_i \omega_i \tag{3.58}$$

$$P_{ei}(\delta) = \sum_{j=i}^{n} Y_{ij} E_i E_j \cos(-\delta_i + \delta_j + \alpha_{ij})$$
(3.59)

Dengan $\dot{\delta}_i = \omega_i$ Dimana :

 M_i : Momen inersia ke i

 $\dot{\omega}$: Percepatan sudut

 P_m : Daya mekanis

 P_e : Daya elektris

D : Koefisien damping

3.5 Pemodelan Kontroler

Pada bagian ini dibahas efek penambahan komponen kontroler. Komponen kontroler yang dimaksud adalah pengontrol tegangan eksitasi (AVR) dan pengontrol kecepatan (*governor*) pada mesin sinkron. Dua pemisalan yang digunakan yaitu sebuah AVR sederhana dan sebuah *governor* sederhana yang keduanya tertinggal 1 waktu dibelakangnya.

3.5.1 Pemodelan AVR

Perubahan dari tegangan medan ΔE karena perubahan nilai E_0 atau *E* terjadi karena adanya perubahan tegangan terminal generator ΔV_{AVR} karena perubahan nilai V_{ref} atau V_t . Selanjutnya diasumsikan *transducer* sempurna atau tidak tertinggal beberapa waktu ke belakang dan dimodifikasi dengan *transfer function* dari sistem eksitasi. Untuk menyederhanakan anlisa, diasumsikan menggunakan model *voltage regulator* (AVR) dan sistem eksitasi yang sederhana. Pemodelan sesuai dengan gambar 3.5 sebagai berikut [14]:



Gambar 3. 5 Blok diagram sistem AVR [2]

Berdasarkan gambar 3.5, dapat dibuat persamaan berikut :

$$\Delta E = \frac{K_{AVR}}{1 + T_{AVR} \cdot s} \Delta V_{AVR} \tag{3.60}$$

$$\Delta V_{AVR} = \left(V_{ref} - V_t \right) \tag{3.61}$$

$$E = E_0 + \Delta E \tag{3.62}$$

Lalu mensubtitusikan persamaan (3.60) dan persamaan (3.61) ke (3.62), maka didapatkan :

$$\dot{E} = \frac{1}{T_{AVR}} \left[(E_0 - E) + K_{AVR} (V_{ref} - V_t) \right]$$
(3.63)

Dimana :

 K_{AVR} : penguatan dari regulator

 T_{AVR} : waktu konstan dari regulator

Lalu dengan menginputkan $V_t = \frac{Ex_l + V_b \cdot x_d}{x}$ sesuai pada teori, dan mengasumsikan $\dot{E} = 0$, maka didapatkan :

$$E = E_0 + K_{AVR} \left(V_{ref} - \frac{Ex_l + V_b \cdot x_d}{x} \right)$$
(3.64)

$$E = \frac{E_0 + K_{AVR} V_{ref} x - K_{AVR} V_b. x_d}{x + K_{AVR} x_l}$$
(3.65)
$$E = \frac{E_0 + K_{AVR} \left(V_{ref} - \frac{V_b. x_d}{x} \right)}{1 + \frac{K_{AVR} x_l}{x}}$$
(3.66)

3.5.2 Pemodelan Governor

Perubahan dari kecepatan sudut mesin ω atau perubahan beban atau perubahan referensi kecepatan yang diproduksi sebagai daya mekanis P_m tergantung pada *speed droop* dan tergantung pada *transfer function* dari *governor* dan sumber energi. Pada pemodelan ini diasumsikan bahwa efek kombinasi dari turbin dan sistem *governor* adalah sedemikian rupa sehingga output daya mekanisnya dapat diilustrasikan sebagai berikut [14]:



Gambar 3. 6 Blok diagram sistem governor [2]

Berdasarkan gambar 3., dapat dibuat persamaan dalam satuan p.u sebagai berikut :

$$\Delta P_m = \frac{K_{GOV}}{1 + T_{GOV} \cdot s} \Delta \omega \tag{3.67}$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \tag{3.68}$$

$$P_m = P_{mref} + \Delta P_m \tag{3.69}$$

Lalu mensubtitusikan persamaan (3.67) dan persamaan (3.68) ke (3.69), maka didapatkan :

$$P_m = \frac{1}{T_{GOV}} \left[\left(P_{mref} - P_m \right) + K_{GOV} \left(\frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \right) \right]$$
(3.70)

Dimana :

 K_{GOV} : penguatan konstan $= \frac{1}{R}$ T_{GOV} : waktu konstan dari *governor*

3.6 Metode Runge-Kutta orde ke-4

Metode perhitungan Runge-Kutta merupakan solusi dari deret taylor. Namun, berbeda dengan solusi deret taylor, metode Runge-Kutta tidak memerlukan evaluasi yang eksplisit dari turunan lebih tinggi daripada turunan pertamanya [6]. Efek dari turunan yang lebih tinggi juga dimasukkan pada beberapa evaluasi dari turunan pertamanya. Kemudian dari jumlah prosesnya, maka deret taylor dapat dibagi menjadi beberapa orde yang berbeda. Rumus umum metode Runge-Kutta orde empat untuk mencari nilai x dengan step $(n + 1)^{st}$ adalah

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$
(3.71)

Dimana,

$$k_1 = f(x_n, t_n) \,\Delta t \tag{3.72}$$

$$k_2 = f\left(x_n + \frac{k_1}{2}, tn + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$
(3.73)

$$k_3 = f\left(x_n + \frac{k_2}{2}, tn + \frac{\Delta t}{2}\right) \Delta t$$
(3.74)

$$k_4 = f(x_n + k_3, tn + \Delta t) \,\Delta t \tag{3.75}$$

Keterangan:

 $k_1 = (slope \text{ pada time step pertama}) \Delta t$ $k_2 = (\text{perhitungan pertama untuk slope pada mid-step}) \Delta t$ $k_3 = (\text{perhitungan kedua untuk slope pada mid-step}) \Delta t$ $k_4 = (slope \text{ pada step terakhir}) \Delta t$ $\Delta x = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$

3.7 Perumusan Masalah

Permasalahan dari analisis kestabilan transien karena terjadi gangguan dapat diilustrasikan sebagai berikut. Pada awalnya, sistem beroperasi dalam kondisi stabil, dilambangkan dengan x_{pre} , ketika gangguan terjadi pada waktu t = 0. Lalu, sistem diatur oleh kestabilan dinamis *fault on* saat sistem sedang mengalami gangguan $[0,\tau]$ yang ditunjukkan sebagai berikut

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \le t \le \tau, x(0) = x_{pre}$$
(3.76)

Dimana $x \in \mathbb{R}^N, t \in \mathbb{R}, f_F: \mathbb{R}^N \to \mathbb{R}^N$.

Kurva dari persamaan (3.76) yang disebut sebagai lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*) dan dinyatakan dengan

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \le t \le \tau$$
 (3.77)

Dimana $X_F(\cdot; x_{pre}) : R \to R^N$.

Gangguan berhasil dihilangkan pada waktu $t = \tau$. Kemudian, sistem diatur oleh kestabilan dinamis setelah terjadinya gangguan (*post-fault*) setelah sistem menghilangkan gangguan sesuai dengan persamaan *nonlinear* berikut :

$$\dot{x} = f(x), \tau \le t \le \infty; \ f: \mathbb{R}^N \to \mathbb{R}^N. \tag{3.78}$$

Kurva solusi dari persamaan (3.78) disebut sebagai lintasan setelah terjadinya gangguan (*post-fault trajectory*) dan direpresentasikan dengan

$$x(t) = X(t; x^{0}), \tau \le t \le \infty; X(\cdot; x^{0}; R^{N} \to R^{N})$$
(3.79)

Dengan catatan bahwa titik awal x^0 adalah suatu titik pada *fault-on trajectory* saat waktu $t = \tau$ atau waktu pemutusan gangguan. Maka persamaan (3.76)-(3.79) dapat disederhanakan menjadi formulasi sebagai berikut :

$$x^{0} = X_{F}(\tau, x_{pre})$$
(3.80)

Pada metode modifikasi hilangnya sinkronisasi (*Modified Losing Synchronism*), lintasan kritis (*critical trajectory*) yang merupakan lintasan setelah terjadinya gangguan (*post-fault trajectory*) memiliki batasan kondisi

Titik awal :

$$x^0 = X_F(CCT, x_{pre}) \tag{3.81}$$

Titik Akhir :

Dengan mengasumsikan bahwa *eigenvector v* selalu searah dengan UEP (*Unstable Equilibrium Point*), yaitu titik hilangnya sinkronisasi sistem, sehingga k_s dapat dianggap konstan. Hal tersebut bertujuan untuk mengurangi jumlah persamaan yang diperlukan agar proses perhitungan menjadi lebih cepat [9]. Jika nilai $k_s = 1$, maka

$$v = \dot{\theta} \tag{3.82}$$

Dan diperoleh persamaan

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta}\right]\dot{\theta} \tag{3.83}$$

3.6.1 Modifikasi Persamaan Trapezoidal

Modifikasi persamaan trapezoidal merupakan langkah awal dalam menggambarkan *critical trajectory*. Berdasarkan persamaan (3.78) pada waktu t^k variabel t diubah menjadi x^k sehingga persamaan tersebut dinotasikan menjadi x^k . Persamaan trapezoidal konvensional adalah sebagai berikut

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k)$$
(3.84)

dimana

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

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



Gambar 3.7 Modifikasi Trapezoidal [16]

Sesuai dengan definisi *critical trajectory* yakni lintasan yang dimulai dari lintasan gangguan sampai pada titik kritisnya. Modifikasi persamaan trapezoidal menitikberatkan pada kondisi ketika gangguan dihilangkan saat CCT dan variabel-variabel berada pada kondisi kritis. Gambar 3.7 menunjukkan suatu lintasan kritis (*critical trajectory*) dimana terdapat dua titik batas, yaitu x^0 dan x^u . Titik x^0 merepresentasian titik awal yaitu pada saat CCT dan x^μ merepresentasikan titik kritis yakni saat mencapai UEP.

Pada gambar tersebut lintasan gangguan digambarkan dengan kurva warna merah sementara kurva hijau merupakan penggambaran critical trajectory. Titik awal dianggap sebagai pemutusan gangguan saat CCT. Oleh karena itu, dari titik tersebut ditarik garis lurus sampai ke titik akhirnya. Dimana masing-masing titik terhubung dengan menggunakan metode trapezoidal.

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 dengan mentransformasikan waktu yang diperlukan untuk mencapai titik akhir menjadi jarak. Pertama, jarak antara dua titik yang disimbolkan dengan epsilon ε didefinisikan sebagai :

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k| (t^{k+1} - t^k)$$
(3.85)

Kemudian, waktu ditransformasikan menjadi jarak dengan persamaan

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon$$
(3.86)

Persamaan (3.86) disubtitusikan ke dalam persamaan (3.85) diperoleh persamaan sebagai berikut

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0$$
(3.87)

Dengan demikian, integrasi numerik terhadap domain waktu ditransformasikan menjadi integrasi terhadap domain jarak. Transformasi ini memungkinkan untuk merepresentasikan lintasan kritis (*critical trajectory*) dengan sejumlah titik yang memiliki jarak sama [16].

3.6.2 Least Square Minimization

Berdasarkan modifikasi persamaan Trapezoidal pada Gambar 3.7 serta penentuan kondisi batas awal dan akhir seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, metode *least square minimization* memiliki perumusan secara umum sebagai berikut :

$$G(x) \begin{cases} x^{k+1} - x^{k} - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^{k}}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^{k}|} \varepsilon = 0 \\ x^{o} = X_{F}(CCT; x_{pre}) = 0 \\ x^{u} = [\theta^{u}_{cg}, \widetilde{\omega}^{u}_{cg}] \end{cases}$$
(3.88)

Dimana variabel-variabelnya adalah : $X = (x^0, x^1, ..., x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau)$

Persamaan di ataslah yang menjadi inti dasar awalan untuk metode critical trajectory yang digunakan. Selanjutnya metode *least square minimization* diselesaikan menggunakan metode Newton Raphson.

(3.89)

Dimana metode Newton Raphson membutuhkan masukan dari hasil perhitungan matriks Jacobian. Dan matriks Jacobian menggunakan metode *weighting matrix* untuk memastikan generator kritis agar masuk dalam perhitungan matriks Jacobian.

3.6.3 Metode Newton Raphson

Suatu fungsi G(X) dimana penyelesaian dari fungsi tersebut adalah X_s . *Initial condition* fungsi adalah X_0 dan selisih nilai sebenarnya dengan hasil perhitungan atau *error* dimisalkan ΔX . Dengan demikian dapat dituliskan persamaan penyelesaian untuk fungsi G(X) adalah : $X_s = X_0 + \Delta X$ (3.90)

Selanjutnya mensubtitusikan persamaan Xs di atas pada *input X* fungsi G(X) dan menggunakan deret Taylor untuk menyelesaikannya. Persamaan umum deret Taylor ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$f(x) = f(x_0) + \frac{(x - x_0)}{1!} f'(x_0) + \dots + \frac{(x - x_0)^m}{m!} f^{(m)}(x_0) + \dots$$
(3.91)

Kemudian subtitusi ke dalam deret Taylor yang ditunjukkan pada persamaan (3.91) tetapi dengan batasan orde hingga orde dua diperoleh :

$$G(X_0 + \Delta X) \cong G(X_0) + \left[\frac{\partial G(X_0)}{\partial X}\right] \Delta X$$
 (3.92)

Penyelesaian fungsi G(X) dengan *error* mendekati nol adalah $G(X_s) = 0$ sehingga persamaan (3.92) dapat ditulis ulang menjadi : $G(X_0) + J\Delta X \cong 0$ (3.93)

Dimana J merupakan matriks Jacobian dengan nilai :

$$J = \frac{\partial G(X)}{\partial X} \tag{3.94}$$

Error yang diperoleh digunakan sebagai nilai inisiasi awal fungsi $G(X_0)$. *Error* keseluruhan yang digunakan pada matriks Jacobian diminimalisasi menjadi :

$$f = (G(X_0) + J\Delta X)^T (G(X_0) + J\Delta X)$$
(3.95)

Turunan pertama persamaan di atas untuk mendapatkan nilai ΔX $f' = J^T (G(X_0) + J\Delta X)^T (G(X_0) + J\Delta X)J = 0$ (3.96)

$$\Delta X = -(J^T J)^{-1} J^T G(X_0) \tag{3.97}$$

Nilai ΔX yang diperoleh digunakan untuk memperbaiki hasil

penyelesaian Xs awal dan hal ini dilakukan terus menerus hingga diperoleh kondisi konvergen yang ditentukan

 $X_{new} = X_{old} + \Delta X \tag{3.98}$

3.6.4 Matriks Jacobian

Critical trajectory diperoleh dengan proses iterasi hingga dicapai kondisi konvergen menggunakan metode newton raphson seperti yang dijelaskan sub bab sebelumnya. Kondisi awal (*initial condition*) trajektori kritis adalah saat gangguan dihilangkan pada CCT dan berakhir pada titik akhir (end point) saat generator kehilangan sinkronisasinya. Matriks Jacobian untuk titik akhir pada metode hilangnya sinkronisasi adalah: <u>Persamaan 1</u>

Persamaan pertama ini berdasarkan pada persamaan ayunan dengan Pm merupakan daya mekanis generator dan Pe merupakan daya elektris generator. Persamaan (3.99) merupakan persamaan yang menunjukkan percepatan yang terjadi.

$$P^{m+1} = P_{mi}^{m+1} - P_{ei}^{m+1}(\theta)$$
(3.99)

$$P^{m+1} = P_{mi}^{m+1} - \sum_{j=i}^{NG} Y_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos\left(-\theta_i^{m+1} + \theta_j^{m+1} + \alpha_{ij}^{m+1}\right)$$
(3.100)

$$\sum_{i=1}^{NG} \sum_{j=1,j\neq 1}^{NG} \left[G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin \theta_{ij}^{m+1} + B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos \theta_{ij}^{m+1} \right]$$
(3.101)

Berdasarkan persamaan (3.101) dimana G merupakan konduktansi saluran dan B merupakan suseptansi saluran, maka diperoleh komponen matriks Jacobian J_1 :

$$J1 = \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} v = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{m+1}}{\partial \theta_1^{m+1}} & \cdots & \frac{\partial P_1^{m+1}}{\partial \theta_{N_G}^{m+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{N_G}^{m+1}}{\partial \theta_1^{m+1}} & \cdots & \frac{\partial P_{N_G}^{m+1}}{\partial \theta_{N_G}^{m+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{N_G} \end{bmatrix}$$
(3.102)

Dimana NG merupakan jumlah generator dan v merupakan *eigenvector*, $\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} = G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} sin \theta_{ij}^{m+1} + B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} cos \theta_{ij}^{m+1}$ (3.103)

Turunan pertama matriks Jacobian J1 sebagai fungsi θ dan v adalah :

$$\partial J1 = \frac{\partial J1}{\partial \theta} + \frac{\partial J1}{\partial v} \tag{3.104}$$

Dengan uraian masing-masing dijelaskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial J_1}{\partial \theta} = \frac{\partial \left(\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta_i^{m+1}}\right)}{\partial \theta_i^{m+1}} v; i = 1, 2, \dots, NG$$

$$\frac{\partial J_1}{\partial v} = \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}}$$
(3.105)
(3.106)

Persamaan 2

Persamaan kedua berhubungan dengan eigenvektor dimana diasumsikan eigenvektor harus sesuai dengan arah θ . Sedangkan k_s dianggap konstan.

$$J2 = v - \dot{\theta}^{m+1} \tag{3.107}$$

$$\partial J2 = \frac{\partial J2}{\partial \theta} + \frac{\partial J2}{\partial \theta^{m+1}}$$
(3.108)

Persamaan (3.106) merupakan turunan pertama persamaan (3.105) sebagai fungsi θ dan v, dengan uraian masing-masing dijelaskan sebagai berikut :

$$\frac{\partial J2}{\partial v} = \begin{bmatrix} 1\\ \vdots\\ 1 \end{bmatrix}$$
(3.109)

$$\frac{\partial J2}{\partial \theta^{m+1}} = \begin{bmatrix} 1\\ \vdots\\ 1 \end{bmatrix}$$
(3.110)

Persamaan 3

$$J^{3} = |v| - 1 \tag{3.111}$$

$$\partial J3 = \frac{\partial J3}{\partial v} = \frac{v}{|v|} \tag{3.112}$$

Ketiga persamaan di atas digunakan pada matriks Jacobian untuk metode modifikasi hilangnya sinkronisasi. Dimana *end point conditions* merupakan pendefinisian titik akhir berdasarkan metode yang digunakan, yakni metode modifikasi hilangnya sinkronisasi.

3.8 Modifikasi Sistem dengan Penambahan SCES

Pada simulasi ini diasumsikan bahwa SCES pada sistem selalu berada dalam kondisi kosong. Apabila terjadi gangguan, SCES dapat langsung bekerja dengan asumsi bahwa SCES hanya melakukan penyerapan (*absorb*) daya atau mengalami proses *charging*, sehingga tidak ada daya yang disalurkan atau disuplai oleh SCES karena tidak dimodelkan *state of charging-discharging* pada SCES.

Supercapacitor Energy Storage (SCES) diasumsikan terdapat pada salah satu bus generator dengan mempertimbangkan adanya kontroler berupa AVR dan governor serta mempertimbangkan damping pada sistem. Pada saat terjadi gangguan tiga fasa, sistem akan mengalami first swing yang nilainya sangat besar dan dapat menyebabkan sistem berpotensi kehilangan sinkronisasinya. Pemasangan SCES bertujuan untuk meredam osilasi first swing dan meningkatkan kestabilan sistem sehingga nilai CCT juga mengalami peningkatan.

Dengan penambahan SCES, pemodelan sistem multimesin dengan *Center of Angle* (COA) atau *Center of Inertia* (COI) dapat dituliskan dengan persamaan ayunan sebagai berikut [9] :

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_i(\delta_i) - P_{SCES}$$
(3.113)

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\delta_i) - P_{SCES}$$
(3.114)

Dimana :

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_T \tag{3.115}$$

$$P_{COA} = \sum_{i=1}^{n} (P_{mi} - P_{ei}(\theta))$$
(3.116)

$$P_{ei}(\theta) = \sum_{j=i}^{n} Y_{ij} E_i E_j \sin(\theta_i - \theta_j + \alpha_{ij})$$
(3.117)

Keterangan:

$$M_i = \text{momen inersia ke-i}$$

$$M_T = \text{momen inersia total}$$

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

$$P_m = \text{daya mekanis}$$

$$P_e = \text{daya elektris}$$

$$D = \text{koefisien } damping$$

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

$$Y_{ij}$$
 = matriks admitansi

$$\theta$$
 = sudut rotor

3.9 Metode Pengerjaan

Pada tugas akhir ini dilakukan simulasi pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES. Diasumsikan setiap saluran transmisi adalah *double circuit*/saluran ganda, dan gangguan 3 fasa terjadi di bus yang lebih dekat dengan titik gangguan pada salah satu saluran transmisinya. Gangguan tersebut kemudian dihilangkan dengan membuka CB di kedua ujung saluran transmisinya.

Selanjutnya dilakukan analisis *power flow* stelah semua parameter awal sistem diperoleh. Untuk mempercepat proses perhiungan dilakukan reduksi matriks jaringan, kemudian untuk memodelkan sistem kondisi pre-fault dan on-fault dilakukan perhitungan dengan metode Runge-Kutta orde ke-4. Lalu, diasumsikan gangguan terjadi, dan fault-on trajectory dapat ditemukan pula dengan metode konvensional (TDS), yang disimpan sebagai $x^0(\tau)$ sebagai fungsi waktu. Lalu $x^0(\tau)$ dengan nilai τ tertentu dipilih sebagai kondisi awal untuk menyimulasikan kondisi dinamis sekaligus pengevaluasi stabilitas dari sistem. Proses tersebut dilakukan secara terus menerus dengan mengganti-ganti nilai τ , dimana proses tersebut dikenal dengan istilah iterasi. Metode pencarian biner pangkat tiga dari *spline* digunakan untuk menentukan nilai kritis dari τ , yaitu CCT. Nilai CCT yang diperoleh dari hasil simulasi tersebut kemudian dibandingkan dengan nilai TDS. Apabila masih berada dalam range TDS, maka nilai CCT dianggap sudah sesuai. Tetapi apabila diluar range TDS, maka dilakukan perubahan pada nilai τ dan dilakukan perhitungan ulang pada sistem.

Pada sistem dengan SCES ditentukan terlebih dahulu bus generator mana yang akan digunakan sebagai lokasi peletakan SCES. Kemudian dilakukan modifikasi pada sistem dengan penambahan SCES sesuai dengan gambar 3.9. Tahapan yang diperlukan untuk memperoleh nilai CCT sistem dengan SCES dan tanpa SCES ditunjukkan pada gambar 3.8 dan 3.9.



Gambar 3.8 Diagram alir untuk memperoleh nilai CCT sistem tanpa SCES.



Gambar 3. 9 Diagram alir untuk memperoleh nilai CCT sistem dengan SCES.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini, dilakukan simulasi pada *plant*/sistem dengan multi mesin/multi generator. Plant yang digunakan adalah modifikasi Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dan modifikasi sistem IEEE 6-machines 57-bus vang terhubung infinite bus dengan damping dan mempertimbangkan kontroler berupa AVR dan governor pada setiap mesinnya. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan nilai *Critical Clearing* Time (CCT) sistem pada saat sebelum dan setelah pemasangan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dengan metode *critical trajectory* berdasarkan modified losing synchronism. 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.

Hasil dari simulasi yang diharapkan adalah dapat mengetahui pengaruh dari pemasangan *Supercapacitor Energy Storage (SCES)* terhadap nilai CCT dan kestabilan sistem tenaga sesaat setelah terjadi gangguan 3 fasa. Pada penelitian ini, pengaruh SCES diketahui dengan cara meletakkan SCES pada tiap bus generator secara bergantian dan meningkatkan kapasitas SCES 0,1-0,5 p.u pada tiap titik gangguan sistem.

4.1 Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus yang Terhubung Infinite Bus dengan Damping dan Mempertimbangkan Kontroler

Untuk simulasi dan analisis perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) yang dilakukan pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus* yang dimodifikasi untuk dihubungkan dengan *infinite bus*, telah ditentukan 9 titik lokasi terjadinya gangguan. Generator 1 dijadikan sebagai referensi untuk menjadi *infinite* bus, sehingga sistem ini diasumsikan hanya memiliki 2 generator yang beroperasi. 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 *2-machine 9-bus* yang terhubung dengan *infinite bus* beserta titik lokasi gangguan dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 *Single Line Diagram* sistem Fouad dan Anderson 2-*machine* 9-*bus* terhubung *infinite bus*

Keterangan:

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

Spesifikasi data saluran transmisi dan data bus sistem dapat dilihat pada tabel 4.1 hingga tabel 4.3 berikut ini.

Tabel 4.1 Data saluran transmisi sistem Fouad dan Anderson 2-machine9-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 4.2 Data bus sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus

No	Togongon	Power G	eneration	Load	
Bus	Bus	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
1	1,040	0,00	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

Berikut dilampirkan parameter yang didapatkan dari sistem, untuk di*input*-kan pada perhitungan selanjutnya. Parameter tersebut antara lain :

1. Daya mekanis generator (P_m)

- 2. Tegangan bus generator (V)
- 3. Daya total generator (*S*)
- 4. Tegangan generator (E_a)

Generator di Bus	$P_m(p.u)$	V (p.u)	E _a (p.u)	
1	0,7164	1,0400	1,0400	
2	1,6300	1,0250	1,0767	
3	0,8500	1,0250	1,0500	

Tabel 4.3 Hasil simulasi power flow untuk generator

Setelah didapatkan parameter-parameter yang sesuai pada tabel 4.3, dapat dikerjakan perhitungan untuk nilai CCT pada masing-masing titik gangguan.

4.1.1 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa Supercapacitor Energy Storage (SCES)

Pada simulasi ini nilai CCT diperoleh pada saat *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) belum terpasang pada sistem dengan tahapan sesuai dengan gambar 3.8. Simulasi yang dilakukan berikut mempertimbangkan koefisien *damping* sebesar 3% dan kontroler berupa AVR dan *governor*. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh. Metode TDS merupakan metode perhitungan tidak langsung dimana CCT yang dihasilkan berupa range waktu pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode Critical Trajectory merupakan metode perhitungan langsung, sehingga dapat diperoleh nilai CCT secara langsung.

Apabila nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* berada di luar range waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS maka hal tersebut dianggap sebagai *error*. *Error* dapat dihitung menggunakan persamaan berikut :

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

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

Dimana :

- rs : batas bawah *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS (batas waktu stabil)
- ru : batas atas *range* waktu pemutusan yang dihasilkan metode TDS (batas waktu tidak stabil)

Error (-) : menunjukkan nilai CCT kurang dari batas waktu stabil Error (+): menunjukkan nilai CCT lebih dari batas waktu tidak stabil

Setting nilai CCT masih aman untuk diterapkan pada sistem apabila antara CCT hasil perhitungan metode *critical trajectory* dan batas bawah *range* stabil (rs) atau batas atas *range* tidak stabil (ru) hasil perhitungan metode TDS memiliki *error* tidak lebih dari \pm 0,5%.

 Tabel 4.4 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa

 SCES

Fault Point	Open Line	Time Domain Simulation (TDS)	Metode Critical Trajectory	Error (%)
Α	2-7	0,22-0,23	0,2288	0
В	3-9	0,31-0,32	0,3121	0
С	4-5	0,32-0,33	0,3272	0
D	4-6	0,32-0,33	0,3247	0
Е	5-7	0,24-0,25	0,2499	0
F	7-8	0,24-0,25	0,2440	0
G	6-9	0,31-0,32	0,3178	0
Н	8-9	0,31-0,32	0,3148	0
Ι	8-9	0,36-0,37	0,3614	0

Tabel 4.4 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik A, range waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,22-0,23 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,2288 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,22 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan

dihilangkan melebihi batas waktu 0,23 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode Critical Trajectory masih berada pada range CCT metode TDS.

Gambar 4.2 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem Fouad dan Anderson 2-*machine 9-bus* tanpa SCES ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik A. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2. Sementara grafik generator 3 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3.



Gambar 4.2 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa SCES pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik A

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.2 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai *stable trajectory* sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi. Sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan karena nilai CCT tidak dapat diamati. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, Grafik yang ditampilkan pada gambar 4.2 hanya pada generator 2 dan 3.

Terdapat 3 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 Analisis Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES)

Pada simulasi ini nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan tahapan sesuai dengan gambar 3.9. SCES dipasang bergantian pada bus generator 2 dan 3 untuk mengetahui pengaruh lokasi peletakan SCES. Simulasi yang dilakukan berikut mempertimbangkan koefisien *damping* sebesar 3% dan kontroler berupa AVR dan *governor*. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh. Metode TDS merupakan metode perhitungan tidak langsung dimana CCT yang dihasilkan berupa range waktu pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode Critical Trajectory merupakan metode perhitungan langsung, sehingga dapat diperoleh nilai CCT secara langsung.

Apabila nilai CCT dari metode Critical Trajectory berada di luar range waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, maka hal tersebut dianggap sebagai *error*. *Error* dapat dihitung menggunakan persamaan (4.1) dan (4.2).

a. Analisis Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 p.u pada Bus Generator 2

Nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 2 pada sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan kapasitas sebesar 0,1 p.u (10 MVA). Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik gangguan yang letaknya sangat dekat dengan bus saluran paralel. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan

dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Fault Point	Open Line	Time Domain Simulation (TDS)	Metode Critical Trajectory	Error (%)
А	2-7	0,24-0,25	0,2480	0
В	3-9	0,31-0,32	0,3149	0
С	4-5	0,34-0,35	0,3443	0
D	4-6	0,35-0,36	0,3501	0
Е	5-7	0,26-0,27	0,2635	0
F	7-8	0,25-0,26	0,2519	0
G	6-9	0,32-0,33	0,3296	0
Н	8-9	0,32-0,33	0,3234	0
Ι	8-9	0,40-0,41	0,4047	0

Tabel 4.5 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-busdengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 2

Tabel 4.5 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik A *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,24-0,25 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,2480 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,24 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,25 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* masih berada pada *range* CCT metode TDS.

Fault Open		Met Konvensio	tode onal (TDS)	Metode Critical Trajectory		
Point	Line	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
А	2-7	0,22-0,23	0,24-0,25	0,2288	0,2480	8,39%
В	3-9	0,31-0,32	0,31-0,32	0,3121	0,3149	0,90%
C	4-5	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3272	0,3443	5,23%
D	4-6	0,32-0,33	0,35-0,36	0,3247	0,3501	7,82%
Е	5-7	0,24-0,25	0,26-0,27	0,2499	0,2635	5,44%
F	7-8	0,24-0,25	0,25-0,26	0,2440	0,2519	3,24%
G	6-9	0,31-0,32	0,32-0,33	0,3178	0,3296	3,71%
Н	8-9	0,31-0,32	0,32-0,33	0,3148	0,3234	2,73%
Ι	8-9	0,36-0,37	0,40-0,41	0,3614	0,4047	11,98%
	Rata-ra	ta CCT sist	0,2979	0,3145	5,58%	

Tabel 4.6 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 2

Selisih yang diperoleh dari tabel 4.6 merupakan selisih dari nilai CCT pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES sebesar 0,1 p.u pada bus generator 2. Nilai selisih yang positif menunjukkan adanya peningkatan CCT setelah pemasangan SCES. Sedangkan, nilai selisih yang negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Gambar 4.3 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem Fouad dan Anderson 2machine 9-bus dengan SCES pada bus generator 2 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik A. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2. Sementara grafik generator 3 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3.



Gambar 4.3 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik A

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.3 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai *stable trajectory* sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi. Sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan karena nilai CCT tidak dapat diamati. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, Grafik yang ditampilkan pada gambar 4.3 hanya pada generator 2 dan 3.

Terdapat 3 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. Analisis Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 p.u pada Bus Generator 3

Nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 3 pada sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan kapasitas sebesar 0,1 p.u (10 MVA). Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik gangguan yang letaknya sangat dekat dengan bus saluran paralel. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Fault Point	Open Line	Time Domain Simulation (TDS)	Metode Critical Trajectory	Error (%)
А	2-7	0,22-0,23	0,2249	0
В	3-9	0,35-0,36	0,3526	0
С	4-5	0,34-0,35	0,3441	0
D	4-6	0,34-0,35	0,3475	0
Е	5-7	0,24-0,25	0,2497	0
F	7-8	0,24-0,25	0,2478	0
G	6-9	0,34-0,34	0,3470	0
Н	8-9	0,35-0,36	0,3556	0
Ι	8-9	0,36-0,37	0,3633	0

 Tabel 4.7 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus

 dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 3

Tabel 4.7 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik A, *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,22-0,23 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,2249 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,22 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan

dihilangkan melebihi batas waktu 0,23 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* masih berada pada *range* CCT metode TDS.

Fault Open		Met Konvensio	tode onal (TDS)	Metode Critical Trajectory		
Point	Line	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
А	2-7	0,22-0,23	0,22-0,23	0,2288	0,2249	-1,70%
В	3-9	0,31-0,32	0,35-0,36	0,3121	0,3526	12,98%
С	4-5	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3272	0,3441	5,17%
D	4-6	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3247	0,3475	7,02%
Е	5-7	0,24-0,25	0,24-0,25	0,2499	0,2497	-0,08%
F	7-8	0,24-0,25	0,24-0,25	0,2440	0,2478	1,56%
G	6-9	0,31-0,32	0,34-0,34	0,3178	0,3470	9,19%
Н	8-9	0,31-0,32	0,35-0,36	0,3148	0,3556	12,96%
Ι	8-9	0,36-0,37	0,36-0,37	0,3614	0,3633	0,53%
	Rata-ra	ta CCT sist	0,2979	0,3147	5,66%	

Tabel 4.8 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpaSCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 3

Selisih yang diperoleh dari tabel 4.8 merupakan selisih dari nilai CCT pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES sebesar 0,1 p.u pada bus generator 3. Nilai selisih yang positif menunjukkan adanya peningkatan CCT setelah pemasangan SCES. Sedangkan, nilai selisih yang negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Gambar 4.4 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem Fouad dan Anderson 2machine 9-bus dengan SCES pada bus generator 2 ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik A. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2. Sementara grafik generator 3 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3.



Gambar 4.4 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 3 saat terjadi gangguan di titik A

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.4 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai *stable trajectory* sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi. Sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan karena nilai CCT tidak dapat diamati. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, Grafik yang ditampilkan pada gambar 4.4 hanya pada generator 2 dan 3.

Terdapat 3 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 Analisis Lokasi Peletakan Supercapacitor Energy Storage (SCES) pada Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus

Pemilihan bus generator terbaik pada sistem untuk meletakkan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dapat diamati dari data nilai CCT yang diperoleh dari hasil simulasi pada kondisi tanpa SCES dan dengan SCES. Pada sistem Fouad dan Anderson *2-machine 9-bus*, simulasi peletakan SCES dilakukan secara bergantian pada bus generator 2 dan 3 pada tiap titik gangguan. Nilai CCT yang diperoleh berdasarkan metode *Critical Trajectory* dapat dilihat pada tabel 4.4, 4.5 dan 4.7.

Tabel 4.9 Rata-rata nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 2machine 9-bus tanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator.

Bus	Rata-Rata	G-P-94 (0/)		
Generator	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)	
2	0,2979	0,3145	5,58%	
3	0,2979	0,3147	5,66%	

Berdasarkan tabel 4.9 dapat diamati pengaruh penambahan SCES pada sistem apabila diletakkan pada tiap bus generator. Selisih yang diperoleh berdasarkan tabel 4.9 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 2 dan bus generator 3.

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 4.9, *ranking* bus generator dengan peningkatan rata-rata nilai CCT sistem terbesar adalah:

- 1. Bus generator 2 (bus 2) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar 5,58% (0,0166 detik).
- 2. Bus generator 3 (bus 3) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar 5,66% (0,0169 detik).

Berdasarkan data tersebut dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan CCT rata-rata yang paling besar pada bus generator 3. Tetapi, sesuai dengan data yang diperoleh pada tabel 4.8, terjadi penurunan nilai CCT pada titik gangguan A dan E. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada sistem Fouad dan Anderson 2-*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 5,58% (0,0166 detik).

4.1.4 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan Penambahan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 – 0,5 p.u di tiap Titik Gangguan Bus Generator 2

Tabel 4.10 menunjukkan perbandingan kenaikan nilai CCT pada tiap titik gangguan pada sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan penambahan kapasitas Supercapacitor Energy Storage (SCES). Kapasitas SCES yang digunakan sebesar 0,1 p.u (10 MVA) s/d 0,5 p.u (50 MVA) pada generator 2 sesuai dengan analisis sebelumnya dimana generator 2 merupakan generator terbaik untuk meletakkan SCES.

SC (nu)			Nilai (Nilai CCT tiap titik gangguan (s)					
(p.u)	А	В	С	D	Е	F	G	Н	Ι
0,1	0,248	0,315	0,344	0,350	0,264	0,252	0,330	0,323	0,405
0,2	0,261	0,308	0,370	0,371	0,283	0,280	0,326	0,320	0,452
0,3	0,282	0,306	0,402	0,403	0,305	0,294	0,325	0,316	0,527
0,4	0,306	0,303	0,443	0,442	0,327	0,310	0,322	0,318	0,618
0,5	0,322	0,302	0,482	0,472	0,350	0,341	0,317	0,319	0,751
Rata- rata	0,284	0,307	0,408	0,407	0,306	0,295	0,324	0,319	0,551

Tabel 4.10 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-busdengan SCES 0,1 p.u - 0,5 p.u di tiap titik gangguan

Tabel 4.10 menunjukkan pengaruh penambahan kapasitas SCES terhadap nilai CCT di tiap titik gangguan sistem Fouad dan Anderson 2machine 9-bus. Dapat diamati bahwa terjadi kenaikan nilai CCT yang berbanding lurus dengan kenaikan kapasitas SCES pada titik gangguan A, C, D, E, F, dan I. Sedangkan pada titik gangguan B, G dan H terjadi penurunan nilai CCT yang berbanding terbalik dengan kenaikan kapasitas SCES. Berdasarkan grafik, pada titik gangguan B, G dan H walaupun terjadi penurunan nilai CCT tetapi sistem dapat kembali stabil setelah terjadinya gangguan dan nilai CCT dapat diamati. Berdasarkan tabel 4.10 menunjukkan bahwa rata-rata waktu pemutusan kritis tertinggi berada di titik gangguan I dengan nilai sebesar 0,551 detik.

4.2 Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem IEEE 6-machine 57-bus yang Terhubung Infinite Bus dengan Damping dan Mempertimbangkan Kontroler

Sistem IEEE 7-machine 57-bus yang dimodifikasi untuk dihubungkan dengan *infinite* bus, telah ditentukan 6 titik lokasi terjadinya gangguan. Generator 1 dijadikan sebagai referensi untuk menjadi *infinite* bus, sehingga sistem ini diasumsikan hanya memiliki 6 generator yang beroperasi. 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 6-machine 57-bus yang terhubung dengan *infinite bus* beserta titik lokasi gangguan dapat dilihat pada gambar 4.5



Gambar 4.5 Single Line Diagram sistem IEEE 6-machine 57-bus terhubung infinite bus

Keterangan:

- A : titik gangguan antara bus 3 dan bus 4, dekat bus 3
- B : titik gangguan antara bus 3 dan bus 15, dekat bus 3
- C : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5, dekat bus 4
- D : titik gangguan antara bus 6 dan bus 5, dekat bus 6
- E : titik gangguan antara bus 6 dan bus 8, dekat bus 6
- F : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8, dekat bus 7

Spesifikasi data saluran transmisi dan data bus sistem dapat dilihat pada tabel 4.11 hingga tabel 4.13 berikut ini.

No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
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
14	13-15	0,0269	0,0869	0,0115
15	1-15	0,0178	0,0910	0,0494

Tabel 4.11 Data saluran transmisi sistem IEEE 6-machine 57-bus

No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
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
37	27-28	0,0618	0,0954	0,0000
38	28-29	0,0418	0,0587	0,0000

No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
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
60	48-49	0,0834	0,1290	0,0024
61	49-50	0,0801	0,1280	0,0000

No.	Line	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u.)
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

Na	Tecore	Power G	eneration	Load		
Bus	Bus	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	

Tabel 4.12 Data bus sistem IEEE 6-machine 57-bus

No Togongon		Power G	eneration	Load		
Bus	Bus	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	

Na	Tecorer	Power G	eneration	Load		
Bus	Bus	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	

Berikut dilampirkan parameter yang didapatkan dari sistem, untuk diinput-kan pada perhitungan selanjutnya. Parameter tersebut antara lain :

- 1. Daya mekanis generator (P_m)
- 2. Tegangan bus generator (V)
- 3. Daya total generator (*S*)
- 4. Tegangan generator (E_a)

Tabel 4.13 Hasil simulasi power flow untuk generator

Generator di Bus	$P_m(p.u)$	V (p.u)	<i>E</i> _a (<i>p.u</i>)
1	3,7422	1,0400	1,0400
2	0,0147	1,0100	0,8108

Generator di Bus	$P_m(p.u)$	V (p.u)	<i>E</i> _a (<i>p</i> . <i>u</i>)
3	0,2066	0,9850	0,9540
4	- 0,6431	0,9800	1,0141
5	6,1125	1,0050	1,2479
6	- 1,4576	0,9800	1,0599
7	- 0,0731	1,0150	1,2555

Setelah didapatkan parameter-parameter yang sesuai pada tabel 4.13, dapat dikerjakan perhitungan untuk nilai CCT pada masing-masing titik gangguan.

4.2.1 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa Supercapacitor Energy Storage (SCES)

Pada simulasi ini nilai CCT diperoleh pada saat *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) belum terpasang pada sistem dengan tahapan sesuai dengan gambar 3.8. Simulasi yang dilakukan berikut mempertimbangkan koefisien *damping* sebesar 3% dan kontroler berupa AVR dan *governor*. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh. Metode TDS merupakan metode perhitungan tidak langsung dimana CCT yang dihasilkan berupa *range* waktu pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode *Critical Trajectory* merupakan metode perhitungan langsung, sehingga dapat diperoleh nilai CCT secara langsung

Apabila nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* berada di luar *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, maka hal tersebut dianggap sebagai *error*. *Error* dapat dihitung menggunakan persamaan (4.1) dan (4.2).

Fault Point	Open Line	Time Domain Simulation (TDS)	Metode Critical Trajectory	Error (%)
Α	3-4	0,19-0,20	0,1997	0
В	3-15	0,18-0,19	0,1844	0

Tabel 4.14 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES

Fault Point	Open Line	Time Domain Simulation (TDS)	Metode Critical Trajectory	Error (%)
С	4-5	0,12-0,13	0,1251	0
D	6-5	0,11-0,12	0,1153	0
Е	6-8	0,10-0,11	0,1071	0
F	7-8	0,23-0,24	0,2384	0

Tabel 4.14 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik E, *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,10-0,11 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,1071 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,10 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,11 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode Critical Trajectory masih berada pada range CCT metode TDS.

Gambar 4.6 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik E. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2. Sementara grafik generator 3 hingga 7 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3 hingga generator 7.



Gambar 4.6 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik E

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.6 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai *stable trajectory* sistem akan berosilasi kembali ke SEP,

yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi, sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, grafik yang ditampilkan pada gambar 4.6 adalah generator 2, 3, 4, 5, 6, dan 7. Dari hasil tersebut terlihat bahwa terdapat 1 generator kritis pada sistem yaitu generator 5 yang mudah mengalami gangguan. Sesuai dengan teori kestabilan, hanya diperlukan 1 generator 2, 3, 4, 6 dan 7 merupakan generator yang kokoh dan stabil sehingga setelah terjadi gangguan pada sistem dapat kembali berosilasi ke SEP.

Terdapat 3 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 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES)

Pada simulasi ini nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator sistem IEEE *6-machine 57-bus* dengan tahapan sesuai dengan gambar 3.9. SCES dipasang bergantian pada bus generator 2, 3, 4, 5 6, dan 7 untuk mengetahui pengaruh lokasi peletakan SCES. Simulasi yang dilakukan berikut mempertimbangkan koefisien *damping* sebesar 3% dan kontroler berupa AVR dan *governor*. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh. Metode TDS merupakan metode perhitungan tidak langsung dimana CCT yang dihasilkan berupa *range* waktu pemutusan, yaitu waktu pemutusan stabil hingga waktu pemutusan tidak stabil. Sedangkan metode *Critical* *Trajectory* merupakan metode perhitungan langsung, sehingga dapat diperoleh nilai CCT secara langsung

Apabila nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* berada di luar *range* waktu hasil simulasi menggunakan metode TDS, maka hal tersebut dianggap sebagai *error*. *Error* dapat dihitung menggunakan persamaan (4.1) dan (4.2).

a. Analisis Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 6machine 57-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 p.u pada Bus Generator 2

Nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 2 pada sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan kapasitas sebesar 0,1 p.u (10 MVA). Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik gangguan yang letaknya sangat dekat dengan bus saluran paralel. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Fault Point	Open Line	pen ine Time Domain Simulation (TDS) Metode Critical Trajectory		Error (%)
Α	3-4	0,19-0,20	0,1996	0
В	3-15	0,18-0,19	0,1844	0
С	4-5	0,12-0,13	0,1250	0
D	6-5	0,11-0,12	0,1153	0
Е	6-8	0,10-0,11	0,1070	0
F	7-8	0,23-0,24	0,2384	0

Tabel 4.15 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1p.u pada bus generator 2

Tabel 4.15 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik E, *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,10-0,11 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,1070 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan

bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,10 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,11 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* masih berada pada *range* CCT metode TDS.

Metode Metode Critical Trajectory Konvensional (TDS) Fault Open Point Line Selisih Tanpa Dengan Tanpa Dengan SCES SCES SCES SCES (%) -0,05% А 3-4 0,19-0,20 0,19-0,20 0,1997 0,1996 В 3-15 0,18-0,19 0,18-0,19 0,1844 0.1844 0,00% С 4-5 0,12-0,13 0,12-0,13 0,1251 0,1250 -0,08% D 6-5 0,11-0,12 0,11-0,12 0,1153 0,1153 0,00% E 6-8 0,10-0,11 0,10-0,11 0,1071 0.1070 -0,09% F 7-8 0,23-0,24 0,23-0,24 0,2384 0,2384 0.00% Rata-rata CCT sistem 0,1617 0,1616 -0,04%

Tabel 4.16 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 2

Selisih yang diperoleh dari tabel 4.16 merupakan selisih dari nilai CCT pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES sebesar 0,1 p.u pada bus generator 2. Nilai selisih yang positif menunjukkan adanya peningkatan CCT setelah pemasangan SCES. Sedangkan, nilai selisih yang negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Gambar 4.7 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik E. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2. Sementara grafik generator 3 hingga 7 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3 hingga generator 7.



Gambar 4.7 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 2 saat terjadi gangguan di titik E

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.7 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai *stable trajectory* sistem akan berosilasi kembali ke SEP,

yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi, sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, grafik yang ditampilkan pada gambar 4.7 adalah generator 2, 3, 4, 5, 6, dan 7. Dari hasil tersebut terlihat bahwa terdapat 1 generator kritis pada sistem yaitu generator 5 yang mudah mengalami gangguan. Sesuai dengan teori kestabilan, hanya diperlukan 1 generator 2, 3, 4, 6 dan 7 merupakan generator yang kokoh dan stabil sehingga setelah terjadi gangguan pada sistem dapat kembali berosilasi ke SEP.

Terdapat 3 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*.

Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) Sistem IEEE 6machine 57-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 p.u pada Bus Generator 3

Nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 3 pada sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan kapasitas sebesar 0,1 p.u (10 MVA). Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik gangguan yang letaknya sangat dekat dengan bus saluran paralel. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Fault Point	Open Line	ne Time Domain Simulation (TDS) Metode Critical Trajecto		Error (%)
А	3-4	0,18-0,19	0,1863	0
В	3-15	0,18-0,19	0,1849	0
С	4-5	0,12-0,13	0,1252	0
D	6-5	0,10,-011	0,1095	0
E	6-8	0,10-0,11	0,1071	0
F	7-8	0,23-0,24	0,2381	0

Tabel 4.17 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1p.u pada bus generator 3

Tabel 4.17 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik E, *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,10-0,11 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,1071 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,10 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waku 0,11 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* masih berada pada *range* CCT metode TDS.

Fault	Open	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
Point	Line	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
А	3-4	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1997	0,1863	-6,71%
В	3-15	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1844	0,1849	0,27%
С	4-5	0,12-0,13	0,12-0,13	0,1251	0,1252	0,08%
D	6-5	0,11-0,12	0,10,-011	0,1153	0,1095	-5,03%
Е	6-8	0,10-0,11	0,10-0,11	0,1071	0,1071	0,00%

Tabel 4.18 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 3

Fault Point	Open Line	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
		Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
F	7-8	0,23-0,24	0,23-0,24	0,2384	0,2381	-0,13%
Rata-rata CCT sistem				0,1617	0,1585	-1,92%

Selisih yang diperoleh dari tabel 4.18 merupakan selisih dari nilai CCT pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES sebesar 0,1 p.u pada bus generator 3. Nilai selisih yang positif menunjukkan adanya peningkatan CCT setelah pemasangan SCES. Sedangkan, nilai selisih yang negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Gambar 4.8 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik E. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2. Sementara grafik generator 3 hingga 7 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3 hingga generator 7.





Gambar 4.8 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 3 saat terjadi gangguan di titik E

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.8 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai *stable trajectory* sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi, sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, grafik yang ditampilkan pada gambar 4.8 adalah generator 2, 3, 4, 5, 6, dan 7. Dari hasil tersebut terlihat bahwa terdapat 1 generator kritis pada sistem yaitu generator 5 yang mudah mengalami gangguan. Sesuai dengan teori kestabilan, hanya diperlukan 1

generator tidak stabil untuk bisa menganalisis ketidakstabilan sistem. Generator 2, 3, 4, 6 dan 7 merupakan generator yang kokoh dan stabil sehingga setelah terjadi gangguan pada sistem dapat kembali berosilasi ke SEP.

Terdapat 3 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. Analisis Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 6machine 57-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 p.u pada Bus Generator 4

Nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 4 pada sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan kapasitas sebesar 0,1 p.u (10 MVA). Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik gangguan yang letaknya sangat dekat dengan bus saluran paralel. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Fault Point	Open Line	Time Domain Simulation (TDS)	Metode Critical Trajectory	Error (%)
А	3-4	0,18-0,19	0,1886	0
В	3-15	0,18-0,19	0,1826	0
С	4-5	0,12-0,13	0,1245	0
D	6-5	0,10-0,11	0,1093	0
Е	6-8	0,10-0,11	0,1069	0
F	7-8	0,23-0,24	0,2369	0

Tabel 4.19 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1p.u pada bus generator 4

Tabel 4.19 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik E, *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,10-0,11 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,1069 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,10 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waku 0,11 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* masih berada pada *range* CCT metode TDS.

Fault	Open	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
Point	Line	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
А	3-4	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1997	0,1886	-5,56%
В	3-15	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1844	0,1826	-0,98%
С	4-5	0,12-0,13	0,12-0,13	0,1251	0,1245	-0,48%
D	6-5	0,11-0,12	0,10-0,11	0,1153	0,1093	-5,20%
Е	6-8	0,10-0,11	0,10-0,11	0,1071	0,1069	-0,19%
F	7-8	0,23-0,24	0,23-0,24	0,2384	0,2369	-0,63%
Rata-rata CCT sistem				0,1617	0,1581	-2,17%

Tabel 4.20 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 4

Selisih yang diperoleh dari tabel 4.20 merupakan selisih dari nilai CCT pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES sebesar 0,1 p.u pada bus generator 4. Nilai selisih yang positif menunjukkan adanya peningkatan CCT setelah pemasangan SCES. Sedangkan, nilai selisih yang negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Gambar 4.9 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik E. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator



2. Sementara grafik generator 3 hingga 7 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3 hingga generator 7.

Gambar 4.9 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 4 saat terjadi gangguan di titik E

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.9 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai stable trajectory sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi, sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, grafik yang ditampilkan pada gambar 4.9 adalah generator 2, 3, 4, 5, 6, dan 7. Dari hasil tersebut terlihat bahwa terdapat 1 generator kritis pada sistem yaitu generator 5 yang mudah mengalami gangguan. Sesuai dengan teori kestabilan, hanya diperlukan 1 generator tidak stabil untuk bisa menganalisis ketidakstabilan sistem. Generator 2, 3, 4, 6 dan 7 merupakan generator yang kokoh dan stabil sehingga setelah terjadi gangguan pada sistem dapat kembali berosilasi ke SEP.

Terdapat 3 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. Analisis Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 6machine 57-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 p.u pada Bus Generator 5

Nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 5 pada sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan kapasitas sebesar 0,1 p.u (10 MVA). Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik gangguan yang letaknya sangat dekat dengan bus saluran paralel. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari
metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Fault Point	Open Line	Time Domain Simulation (TDS)	Metode Critical Trajectory	Error (%)
Α	3-4	0,19-0,20	0,1979	0
В	3-15	0,19-0,20	0,1980	0
С	4-5	0,13-0,14	0,1337	0
D	6-5	0,11-0,12	0,1115	0
Е	6-8	0,10-0,11	0,1090	0
F	7-8	0,25-0,26	0,2537	0

Tabel 4.21 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1p.u pada bus generator 5

Tabel 4.21 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik E, *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,10-0,11 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,1090 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,10 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waku 0,11 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* masih berada pada *range* CCT metode TDS.

dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 5							
Fault Point	Open Line	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory			
		Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)	
А	3-4	0,19-0,20	0,19-0,20	0,1997	0,1979	-0,90%	
В	3-15	0.18-0.19	0.19-0.20	0.1844	0.1980	7.38%	

Tabel 4.22 Nilai CCT sistem IEEE *6-machine 57-bus* tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 5

Fault Point	Open	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
	Line	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
С	4-5	0,12-0,13	0,13-0,14	0,1251	0,1337	6,87%
D	6-5	0,11-0,12	0,11-0,12	0,1153	0,1115	-3,30%
Е	6-8	0,10-0,11	0,10-0,11	0,1071	0,1090	1,77%
F	7-8	0,23-0,24	0,25-0,26	0,2384	0,2537	6,42%
Rata-rata CCT sistem			0,1617	0,1673	3,04%	

Selisih yang diperoleh dari tabel 4.29 merupakan selisih dari nilai CCT pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES sebesar 0,1 p.u pada bus generator 5. Nilai selisih yang positif menunjukkan adanya peningkatan CCT setelah pemasangan SCES. Sedangkan, nilai selisih yang negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Gambar 4.10 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik E. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2. Sementara grafik generator 3 hingga 7 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3 hingga generator 7.





Gambar 4.10 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 5 saat terjadi gangguan di titik E

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.10 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai *stable trajectory* sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan, terjadi, sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, grafik yang ditampilkan pada gambar 4.10 adalah generator 2, 3, 4, 5, 6, dan 7. Dari hasil tersebut terlihat bahwa terdapat 1 generator kritis pada sistem yaitu generator 5 yang mudah mengalami gangguan. Sesuai dengan teori kestabilan, hanya diperlukan 1

generator tidak stabil untuk bisa menganalisis ketidakstabilan sistem. Generator 2, 3, 4, 6 dan 7 merupakan generator yang kokoh dan stabil sehingga setelah terjadi gangguan pada sistem dapat kembali berosilasi ke SEP.

Terdapat 3 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. Analisis Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 6machine 57-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 p.u pada Bus Generator 6

Nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 6 pada sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan kapasitas sebesar 0,1 p.u (10 MVA). Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik gangguan yang letaknya sangat dekat dengan bus saluran paralel. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Fault Point	Open Line	Open LineTime Domain Simulation (TDS)Metode Critical Trajector		Error (%)
Α	3-4	0,18-0,19	0,1887	0
В	3-15	0,18-0,19	0,1827	0
С	4-5	0,12-0,13	0,1245	0
D	6-5	0,10-0,11	0,1089	0
Е	6-8	0,10-0,11	0,1066	0
F	7-8	0,23-0,24	0,2395	0

Tabel 4.23 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1p.u pada bus generator 6

Tabel 4.23 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik E, *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,10-0,11 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,1066 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,10 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waktu 0,11 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* masih berada pada *range* CCT metode TDS.

Tabel 4.24 Nilai CCT sistem IEEE *6-machine 57-bus* tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 6

Fault	Open	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
Point	Line	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
А	3-4	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1997	0,1887	-5,51%
В	3-15	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1844	0,1827	-0,92%
С	4-5	0,12-0,13	0,12-0,13	0,1251	0,1245	-0,48%
D	6-5	0,11-0,12	0,10-0,11	0,1153	0,1089	-5,55%
Е	6-8	0,10-0,11	0,10-0,11	0,1071	0,1066	-0,47%
F	7-8	0,23-0,24	0,23-0,24	0,2384	0,2395	0,46%
Rata-rata CCT sistem				0,1617	0,1585	-2,08%

Selisih yang diperoleh dari tabel 4.24 merupakan selisih dari nilai CCT pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES sebesar 0,1 p.u pada bus generator 6. Nilai selisih yang positif menunjukkan adanya peningkatan CCT setelah pemasangan SCES. Sedangkan, nilai selisih yang negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Gambar 4.11 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik E. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator



2. Sementara grafik generator 3 hingga 7 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3 hingga generator 7.

Gambar 4.11 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE *6-machine 57-bus* tanpa SCES pada bus generator 6 saat terjadi gangguan di titik E

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.11 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai stable trajectory sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai unstable trajectory sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi, sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, grafik yang ditampilkan pada gambar 4.11 adalah generator 2, 3, 4, 5, 6, dan 7. Dari hasil tersebut terlihat bahwa terdapat 1 generator kritis pada sistem vaitu generator 5 yang mudah mengalami gangguan. Sesuai dengan teori kestabilan, hanya diperlukan 1 generator tidak stabil untuk bisa menganalisis ketidakstabilan sistem. Generator 2, 3, 4, 6 dan 7 merupakan generator yang kokoh dan stabil sehingga setelah terjadi gangguan pada sistem dapat kembali berosilasi ke SEP.

Terdapat 3 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. Analisis Nilai *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 6machine 57-bus dengan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 p.u pada Bus Generator 7

Nilai CCT diperoleh pada kondisi *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) telah terpasang pada bus generator 7 pada sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan kapasitas sebesar 0,1 p.u (10 MVA). Pada simulasi ini, diasumsikan bahwa sistem mengalami gangguan tiga fasa pada sebuah titik gangguan yang letaknya sangat dekat dengan bus saluran paralel. Nilai CCT yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil dari

metode *Time Domain Simulation* (TDS) untuk mengetahui ketepatan hasil yang diperoleh.

Fault Point	Open Line	Time Domain Simulation (TDS)	Metode Critical Trajectory	Error (%)
А	3-4	0,18-0,19	0,1894	0
В	3-15	0,18-0,19	0,1835	0
С	4-5	0,12-0,13	0,1248	0
D	6-5	0,10-0,11	0,1093	0
E	6-8	0,10-0,11	0,1069	0
F	7-8	0,23-0,24	0,2393	0

Tabel 4.25 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan SCES 0,1p.u pada bus generator 7

Tabel 4.25 menunjukkan hasil CCT yang diperoleh dengan metode *Critical Trajectory* dan metode TDS untuk setiap titik gangguan. Sebagai contoh, saat terjadi gangguan di titik E, *range* waktu pemutusan kritis (CCT) yang dihasilkan metode TDS adalah 0,10-0,11 detik, sedangkan waktu pemutusan kritis (CCT) yang diperoleh dari metode *Critical Trajectory* adalah 0,1069 detik. Berdasarkan hasil tersebut dapat diartikan bahwa sistem masih akan tetap stabil saat gangguan dihilangkan sebelum batas waku 0,10 detik, namun sistem akan tidak stabil jika gangguan dihilangkan melebihi batas waku 0,11 detik, dengan *error* sebesar 0% karena nilai CCT dari metode *Critical Trajectory* masih berada pada *range* CCT metode TDS.

0		F F F F F F F F F	0	-		
Fault Point	Open	Metode Open Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
	Line	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
А	3-4	0,19-0,20	0,18-0,19	0,1997	0,1894	-5,16%
В	3-15	0,18-0,19	0,18-0,19	0,1844	0,1835	-0,49%

Tabel 4.26 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES dan dengan SCES 0,1 p.u pada bus generator 7

Fault	Open	Metode Konvensional (TDS)		Metode Critical Trajectory		
Point 1	Ĺine	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES	Selisih (%)
С	4-5	0,12-0,13	0,12-0,13	0,1251	0,1248	-0,24%
D	6-5	0,11-0,12	0,10-0,11	0,1153	0,1093	-5,20%
Е	6-8	0,10-0,11	0,10-0,11	0,1071	0,1069	-0,19%
F	7-8	0,23-0,24	0,23-0,24	0,2384	0,2393	0,38%
Rata-rata CCT sistem			0,1617	0,1589	-1,82%	

Selisih yang diperoleh dari tabel 4.26 merupakan selisih dari nilai CCT pada kondisi sistem tanpa SCES dan dengan SCES sebesar 0,1 p.u pada bus generator 7. Nilai selisih yang positif menunjukkan adanya peningkatan CCT setelah pemasangan SCES. Sedangkan, nilai selisih yang negatif menunjukkan adanya penurunan nilai CCT setelah pemasangan SCES.

Gambar 4.12 menunjukkan grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES ketika terjadi gangguan tiga fasa pada titik E. Grafik generator 2 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 2. Sementara grafik generator 3 hingga 7 menunjukkan kondisi kestabilan sistem dilihat dari generator 3 hingga generator 7.





Gambar 4.12 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa SCES pada bus generator 7 saat terjadi gangguan di titik E

Pada grafik yang disajikan pada gambar 4.12 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Apabila CB memutus gangguan kurang dari atau diantara waktu stabil dan tidak stabil, maka sesuai *stable trajectory* sistem akan berosilasi kembali ke SEP, yaitu keadaan stabil sistem sebelum mengalami gangguan. Dan sebaliknya, apabila CB memutus gangguan lebih dari waktu tidak stabil, maka sesuai *unstable trajectory* sistem akan berosilasi ke keadaan tidak sabil setelah mengalami gangguan. Generator 1 dianggap merupakan grid (PLN) dengan bus *infinite* pada bus 1 yang selalu stabil dan tetap dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi, sehingga grafik generator 1 tidak ditampilkan. Untuk dapat mengamati nilai CCT sistem setelah mengalami gangguan, grafik yang ditampilkan pada gambar 4.12 adalah generator 2, 3, 4, 5, 6, dan 7. Dari hasil tersebut terlihat bahwa terdapat 1 generator kritis pada sistem yaitu generator 5 yang mudah

mengalami gangguan. Sesuai dengan teori kestabilan, hanya diperlukan 1 generator tidak stabil untuk bisa menganalisis ketidakstabilan sistem. Generator 2, 3, 4, 6 dan 7 merupakan generator yang kokoh dan stabil sehingga setelah terjadi gangguan pada sistem dapat kembali berosilasi ke SEP.

Terdapat 3 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 Analisis Lokasi Peletakan Supercapacitor Energy Storage (SCES) pada Sistem IEEE 6-machine 57-bus

Pemilihan bus generator terbaik pada sistem untuk meletakkan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dapat diamati dari data nilai CCT yang diperoleh dari hasil simulasi pada kondisi tanpa SCES dan dengan SCES. Pada sistem IEEE *6-machine 57-bus*, simulasi peletakan SCES dilakukan secara bergantian pada bus generator 2, 3, 4, 5, 6, dan 7 pada tiap titik gangguan. Nilai CCT yang diperoleh berdasarkan metode *Critical Trajectory* dapat dilihat pada tabel 4.14, 4.15, 4.17, 4.19, 4.21, 4.23 dan 4.25.

Bus	Rata-Rata		
Generator	Tanpa SCES	Fanpa SCESDengan SCES	
2	0,1617	0,1616	-0,04%
3	0,1617	0,1585	-1,92%
4	0,1617	0,1581	-2,17%
5	0,1617	0,1673	3,04%
6	0,1617	0,1585	-2,08%
7	0,1617	0,1589	-1,82%

Tabel 4.27 Rata-rata nilai CCT untuk sistem IEEE 6-machine 57-bustanpa SCES dan dengan SCES pada bus generator.

Berdasarkan tabel 4.27 dapat diamati pengaruh penambahan SCES pada sistem apabila diletakkan pada tiap bus generator. Selisih yang

diperoleh berdasarkan tabel 4.27 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 2, 3, 4, 5, 6, dan 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 meletakkan SCES. Berdasarkan tabel 4.37, *ranking* bus generator dengan peningkatan rata-rata nilai CCT sistem terbesar adalah:

- 1. Bus generator 2 (bus 2) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar -0,04%% (0,0001 detik).
- 2. Bus generator 3 (bus 3) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar -1,92% (0,0032 detik).
- 3. Bus generator 4 (bus 4) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar -2,17% (0,0036 detik).
- 4. Bus generator 5 (bus 5) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar 3,04% (0,0056 detik).
- 5. Bus generator 6 (bus 6) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar -2,08% (0,0032 detik).
- 6. Bus generator 7 (bus 7) dengan peningkatan rata-rata CCT sistem sebesar -1,82% (0,0028 detik).

Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada sistem IEEE 6-machine 57-bus, bus generator terbaik untuk meletakkan SCES dengan kapasitas 10 MVA adalah bus generator 5 (bus 8) dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 3,04% (0,0056 detik).

4.2.4 Analisis Nilai Critical Clearing Time (CCT) pada Sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan Penambahan Supercapacitor Energy Storage (SCES) 0,1 – 0,5 p.u di tiap Titik Gangguan Bus Generator 5

Tabel 4.28 menunjukkan perbandingan kenaikan nilai CCT pada tiap titik gangguan pada sistem IEEE 6-machine 57-bus dengan penambahan kapasitas Supercapacitor Energy Storage (SCES). Kapasitas SCES yang digunakan sebesar 0,1 p.u (10 MVA) s/d 0,5 p.u (50 MVA) pada generator 5 sesuai dengan analisis sebelumnya dimana generator 5 merupakan generator terbaik untuk meletakkan SCES.

SC (nu)	Nilai CCT tiap titik gangguan (s)								
(p.u)	Titik A	Titik B	Titik C	Titik D	Titik E	Titik F			
0,1	0,1979	0,1980	0,1337	0,1115	0,1090	0,2537			
0,2	0,2062	0,2063	0,1371	0,1135	0,1110	0,2719			
0,3	0,2153	0,2153	0,1407	0,1213	0,1131	0,2941			
0,4	0,2253	0,2342	0,1445	0,1237	0,1153	0,3217			
0,5	0,2456	0,2456	0,1536	0,1202	0,1225	0,3573			
Rata- rata	0,2181	0,2199	0,1419	0,1180	0,1142	0,2997			

Tabel 4.28 Nilai CCT sistem IEEE *6-machine 57-bus* dengan SCES 0,1 p.u - 0,5 p.u di tiap titik gangguan

Tabel 4.28 menunjukkan pengaruh penambahan kapasitas SCES terhadap nilai CCT di tiap titik gangguan sistem IEEE 6-machine 57-bus. Dapat diamati bahwa terjadi kenaikan nilai CCT yang berbanding lurus dengan kenaikan kapasitas, tetapi pada titik D terjadi penurunan nilai CCT pada saat kapasitas SCES 0,5 p.u. Hal tersebut dapat diartikan bahwa tidak di semua titik gangguan akan selalu mengalami kenaikan nilai CCT pada kapasitas SCES tertentu dan pada titik gangguan D mengalami optimal SCES pada nilai 0,4 p.u. Dari 6 titik gangguan yang disimulasikan peningkatan tertinggi hasil CCT dengan metode *Critical Trajectory* berada di titik gangguan F dengan rata-rata waktu pemutusan kritis sebesar 0,2997 detik.

4.3 Perbandingan *Critical Clearing Time* (CCT) pada Sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa Damping dan dengan Damping yang Terhubung Infinite Bus serta mempertimbangkan Kontroler

Tabel 4.29 menunjukkan perbandingan nilai CCT pada tiap titik gangguan pada sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpa dan

dengan damping, yang disimulasikan dengan adanya pengaruh pemasangan SCES 0,1 p.u dan sistem tanpa SCES pada bus generator 2.

Fault	Open	Tanpa SCES		Dengan SCES		
Point	Line	Tanpa <i>Damping</i>	Dengan Damping	Tanpa <i>Damping</i>	Dengan Damping	
А	2-7	0,2000	0,2288	0,2155	0,2249	
В	3-9	0,2600	0,3121	0,2597	0,3526	
С	4-5	0,2700	0,3272	0,2913	0,3441	
D	4-6	0,2800	0,3247	0,3004	0,3475	
E	5-7	0,2100	0,2499	0,2372	0,2497	
F	7-8	0,2100	0,2440	0,2371	0,2478	
G	6-9	0,2500	0,3178	0,2617	0,3470	
Н	8-9	0,2600	0,3148	0,2684	0,3556	
Ι	8-9	0,3100	0,3614	0,3408	0,3633	
Rata CCT s	-rata sistem	0,2500	0,2979	0,2680	0,3145	

Tabel 4.29 Nilai CCT sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus tanpadan dengan damping

Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa dengan adanya *damping* pada sistem sebesar 3% dapat meningkatkan rata-rata nilai CCT pada sistem tanpa SCES sebesar 0,0479 detik. Sedangkan pada sistem dengan SCES 0,1 p.u, rata-rata nilai CCT dengan *damping* naik sebesar 0,0465 detik. Dari hasil tersebut dapat dilihat damping dapat menaikan nilai CCT sistem secara keseluruhan di seluruh titik gangguan.

4.4 Perbandingan *Critical Clearing Time* (CCT) pada Sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa *Damping* dan dengan *Damping* yang Terhubung *Infinite Bus* serta mempertimbangkan Kontroler

Tabel 4.30 menunjukkan perbandingan nilai CCT pada tiap titik gangguan pada sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa dan dengan

damping, yang disimulasikan dengan adanya pengaruh pemasangan SCES 0,1 p.u dan sistem tanpa SCES pada bus generator 5.

Fault	Open	Tanpa d	lamping	Dengan	damping
Point	Line	Tanpa SCES	Dengan SCES	Tanpa SCES	Dengan SCES
A	3-4	0,1775	0,1838	0,1997	0,1979
В	3-15	0,1703	0,1841	0,1844	0,1980
С	4-5	0,1177	0,1258	0,1251	0,1337
D	6-5	0,1093	0,1083	0,1153	0,1115
E	6-8	0,0991	0,1034	0,1071	0,1090
F	7-8	0,2126	0,2244	0,2384	0,2537
Rata-rata CCT sistem		0,1478	0,1550	0,1617	0,1673

Tabel 4.30 Nilai CCT sistem IEEE 6-machine 57-bus tanpa dan dengan damping

Berdasarkan hasil tersebut, diketahui bahwa dengan adanya *damping* pada sistem sebesar 3% dapat meningkatkan rata-rata nilai CCT pada sistem tanpa SCES sebesar 0,0139 detik. Sedangkan pada sistem dengan SCES 0,1 p.u, rata-rata nilai CCT dengan *damping* naik sebesar 0,0123 detik. Dari hasil tersebut dapat dilihat damping dapat menaikan nilai CCT sistem secara keseluruhan di seluruh titik gangguan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5 PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis penelitian ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

- 1. Penambahan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) pada sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dan IEEE 6-machine 57-bus dapat mempengaruhi nilai CCT yang dihasilkan.
- Untuk sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus, bus generator 2 (bus 2) dipilih sebagai lokasi peletakan SCES terbaik dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 5,58% (0,0166 detik).
- 3. Kenaikan nilai CCT pada sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9bus tidak selalu berbanding lurus dengan penambahan kapasitas SCES nya. Terjadi penurunan CCT pada titik gangguan B, G, dan H yang berbanding terbalik dengan semakin bertambahnya kapasitas SCES.
- 4. Untuk sistem IEEE *6-machine 57-bus*, bus generator 5 (bus 8) dipilih sebagai lokasi peletakan SCES terbaik dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 3,04% (0,0056 detik).
- 5. Kenaikan nilai CCT pada sistem IEEE *6-machine 57-bus* berbanding lurus dengan penambahan kapasitas SCES nya kecuali pada titik gangguan D pada saat kapasitas SCES sebesar 0,5 p.u. Pada titik gangguan D memiliki nilai SCES optimal sebesar 0,4 p.u.
- 6. Dengan menambahkan kumparan peredam pada generator sistem, mampu meningkatkan kestabilan sistem dan nilai CCT pada seluruh titik gangguan, sehingga rata-rata CCT sistem secara keseluruhan juga mengalami peningkatan.

5.2 Saran

Adapun beberapa saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini sebagai berikut :

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada plant lain sehingga diperoleh perbandingan tiap plant terhadap pengaruh dari penambahan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dengan lokasi peletakan SCES yang berbeda-beda dan penambahan kapasitas SCES pada tiap titik gangguannya.

- 2. Perlu dilakukan 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.
- 3. Perlu dilakukan lebih banyak simulasi pada plant yang lebih kompleks, sistem standart IEEE, dan standart yang digunakan secara Internasional untuk membuktikan keakuratan metode dalam memberikan penilaian terhadap kestabilan transien pada sistem multimesin yang lebih lanjut.
- 4. Perlu dilakukan simulasi lebih lanjut pada sistem kelistrikan industri sehingga metode yang diusulkan dapat diaplikasikan pada dunia perindustrian.
- 5. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap pemodelan SCES sebagai peningkat kestabilan transien sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- A. A. Nurhasyimi, "Penentuan Letak Supercapacitor Energy Storage (SCES) Berdasarkan Metode Critical Trajectory Untuk Memperbaiki Nilai Critical Clearing Time (CCT)", Teknik Elektro Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2019.
- [2] M. F. Hakim, "Analisis Stabilitas Transien Menggunakan Metode Trajektori Kritis pada Sistem Multi Mesin dengan Mempertimbangkan AVR dan Governor", Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015
- [3] Das, J.C., "Transient in Electrical Systems, Analysis ,Recognition, and Mitigation", McGraw-Hill Companies Inc, ch. 12 2010.
- Aldhimas, "Analisis Kestabian [4] Satria, Transien dan Mekanisme Pelepasan Beban di Project Pakistan Deep Water Container Port". Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabava, 2014.
- [5] P. Kundur et al., "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] P. Kundur, "Power System Stability and Control", University of Toronto, Toronto, McGrawHill Inc, Ch. 2, 1994.
- J. J. Grainger dan W. D. Stevenson, "*Power System Analysis*", 1st ed. McGraw-Hill Education, ch. 16, 1994.
- [8] J. D. Glover, M. S. Sarma, dan T. J. Overbye, "Power System Analysis and Design", 5th ed. CL Engineering, ch. 11, 2012.
- [9] T. P. Sari, A. Priyadi, dan M. Pujiantara, "Improving Transient Stability Assessment by Installing Supercapacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism", ISITIA Conference, pp. 2-3, 2018.
- [10] 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.

- [11] S. J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", 4th ed. McGraw-Hill Inc, New York, 2005.
- [12] J. R. Miller, "Introduction to Electrochemical Capacitor Technology", IEEE Electr. Insul. Mag., 2010.
- [13] 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.
- [14] A. Priyadi, M. Hery, M. Pujiantara, N. Yorino, and I. Hafidz, "Buku Bahan Ajar Kestabilan Transien" Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab. 2-3, 2017.
- [15] K. Ariyo, Funso, "Electrical Network Reduction for Load Flow and Short-Circuit Calculations using PowerFactory Software", Electrical and Electronic Engineering, 2013.
- [16] A. Priyadi dkk., "Comparison of Critical Trajectory Methods for Direct CCT Computation for Transient Stability", IEEJ Transactions on Power and Energy, 2010.

BIOGRAFI PENULIS



Nazila Iyyaya Fariha, lahir di Bojonegoro pada tanggal 24 Februari 1998. Penulis merupakan alumni dari SDN Kadipaten 2 Bojonegoro, SMPN 1 Bojonegoro, dan SMAN 1 Bojonegoro. Pada tahun 2016, penulis melanjutkan studinya di Departemen Teknik Elektro ITS dengan memilih bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selama perkuliahan, sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) 2018-2020. Selain itu, penulis juga pernah mengikuti Program

Magang Mahasiswa Bersertifikat (PMMB) yang diadakan oleh PT. PLN (Persero) selama 6 bulan pada tahun 2019-2020. Untuk menghubungi penulis, dapat melalui alamat email nazilaiyyaya@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

- 1) Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan damping dan tanpa SCES pada bus generator 2 dan 3
- Gen 3 Gen 2 20 10 10 5 omega [rad/s] omega [rad/s] 0 0 -5 -10 -10 └─ -1 -20 0 1 2 0 -2 2 6 8 10 4 delta [rad] delta [rad] Titik gangguan C 2.



1. Titik gangguan B

3. Titik gangguan D



6. Titik gangguan G



2) Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan damping dan SCES 0,1 p.u pada bus generator 2



1. Titik gangguan B

3. Titik gangguan D



6. Titik gangguan G



3) Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem Fouad dan Anderson 2-machine 9-bus dengan damping dan SCES 0,1 p.u pada bus generator 3



1. Titik gangguan B

3. Titik gangguan D



6. Titik gangguan G



 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6machine 57-bus dengan damping dan tanpa SCES pada bus generator 2-7



1. Titik gangguan A

2. Titik gangguan B



3. Titik gangguan C



4. Titik gangguan D



5. Titik gangguan F


5) Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6machine 57-bus dengan damping dan SCES 0,1 p.u pada bus generator 2











 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6machine 57-bus dengan damping dan SCES 0,1 p.u pada bus generator 3











 Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6machine 57-bus dengan damping dan SCES 0,1 p.u pada bus generator 4











8) Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6machine 57-bus dengan damping dan SCES 0,1 p.u pada bus generator 5











9) Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6machine 57-bus dengan damping dan SCES 0,1 p.u pada bus generator 6











10) Grafik karakteristik ω (rad/s) terhadap δ (rad) untuk sistem IEEE 6machine 57-bus dengan damping dan SCES 0,1 p.u pada bus generator 7









