



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENERAPAN METODE *Critical Trajectory* PADA
OPTIMASI PELETAKAN SUPER CAPACITOR ENERGY
STORAGE (SCES) BERBASIS INDEKS ENERGI**

Aprilia Rahmayanti
NRP 07111540000086

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

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



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENERAPAN METODE *CRITICAL TRAJECTORY* PADA
OPTIMASI PELETAKAN SUPER CAPACITOR ENERGY
STORAGE (SCES) BERBASIS INDEKS ENERGI**

Aprilia Rahmayanti
NRP 07111540000086

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

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



ITS

Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

*An Application of Critical Trajectory Method on
Super Capacitor Energy Storage (SCES) Placement
Optimization Based on Energy Index*

Aprilia Rahmayanti
NRP 0711154000008

Supervisors
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

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

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Penerapan Metode Critical Trajectory pada Optimasi Peletakan Super Capacitor Energy Storage (SCES) Berbasis Indeks Energi**” 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 2019



Aprilia Rahmayanti

07111540000086

Halaman ini sengaja dikosongkan

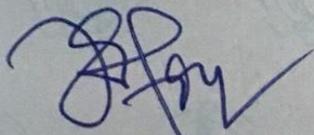
LEMBAR PENGESAHAN
PENERAPAN METODE CRITICAL TRAJECTORY
PADA OPTIMASI PELETAKAN SUPER CAPACITOR
ENERGY STORAGE (SCES) BERBASIS INDEKS
ENERGI

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui :

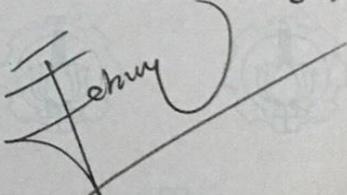
Dosen Pembimbing I,



Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.

NIP. 197309271998031004

Dosen Pembimbing II,



Feby Agung Pamuji, S.T., M.T., Ph.D.

NIP. 198702062012121002



Halaman ini sengaja dikosongkan

PENERAPAN METODE *Critical Trajectory* PADA OPTIMASI PELETAKAN *SUPER CAPACITOR ENERGY STORAGE (SCES)* BERBASIS INDEKS ENERGI

Nama : Aprilia Rahmayanti

Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.

Dosen Pembimbing II : Feby Agung Pamuji, ST., MT., Ph.D.

ABSTRAK

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk menjaga sinkronisme pada generator selama gangguan. Oleh karena itu, sistem membutuhkan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT) berdasarkan respons sudut rotor. Pemasangan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) bertujuan untuk memperbaiki CCT agar gangguan dapat dihilangkan sebelum generator terlepas dari sistem. Saat terjadi gangguan, SCES akan merespons sistem dengan menyerap daya mekanis berlebih dari *Critical Generator* (CG). Kemudian, optimasi peletakan SCES akan didukung oleh metode *Boundary Controlling UEP Shadowing* (BCU Shadowing) untuk menentukan CG berdasarkan generator yang memiliki indeks energi terbesar. Pada sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus, CG terletak di generator ke-2. Sementara pada sistem IEEE 7-generator 57-bus, CG terletak di generator ke-5. Penelitian ini akan membuktikan adanya peningkatan CCT rata-rata selama 0.01 detik apabila SCES diletakkan pada bus CG. Metode *Critical Trajectory* (CTrj) adalah metode untuk perhitungan CCT dengan menggunakan kehilangan sinkronisme (*modified losing synchronism*) sebagai kondisi titik akhir.

Kata kunci: BCU Shadowing, Critical Clearing Time (CCT), Critical Generator (CG), Critical Trajectory (CTrj), Indeks Energi, Kestabilan Transien, Modified Losing Synchronism, Super Capacitor Energy Storage (SCES).

Halaman ini sengaja dikosongkan

AN APPLICATION OF CRITICAL TRAJECTORY METHOD ON SUPER CAPACITOR ENERGY STORAGE (SCES) PLACEMENT OPTIMIZATION BASED ON ENERGY INDEX

Name : Aprilia Rahmayanti
Supervisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Supervisor II : Feby Agung Pamuji, ST., MT., Ph.D.

ABSTRACT

Transient stability is the ability of a power system to maintain synchronism of the generators during the disturbance. Therefore, the power system needs the Critical Clearing Time (CCT) refers to the responses of the rotor angle. Installing Super Capacitor Energy Storage (SCES) aims to improve the CCT so it will clear the disturbance before the generator is released from the system. When the disturbance happens, SCES will absorb the excess of mechanical power from the Critical Generator (CG). An optimization of SCES placement supported by the Boundary Controlling UEP Shadowing (BCU Shadowing) to determine CG based on a generator which has the biggest of energy index. On 3-machine 9-bus Anderson and Fouad system, the CG is located at the 2nd generator. While, the CG of IEEE 7-machine 57-bus system is the 5th of the generator. This final project proves the enhancement of average of CCT up to 0.01 second when SCES is placed on the CG bus. Critical Trajectory (CTrj) is a method to calculate the CCT uses modified losing synchronism as its endpoint condition.

Keywords: *BCU Shadowing, Transient Stability, Critical Clearing Time (CCT), Critical Generator (CG), Critical Trajectory (CTrj), Energy Index, Modified Losing Synchronism, Super Capacitor Energy Storage (SCES).*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillaahi Robbil 'Alamin. Puji syukur Penulis ucapkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayahnya-Nya sehingga dapat menyelesaikan penelitian ini. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah berjasa dalam hidupnya:

1. Allah SWT yang telah memberikan kekuatan fisik, mental serta petunjuk dalam menyelesaikan penelitian ini.
2. Kedua orang tua tercinta yang selalu memberikan doa, dukungan, nasihat, dan uang bulanan tanpa henti. Semoga Allah SWT selalu melindungi mereka di dunia maupun di akhirat.
3. Kedua kakak ku yang selalu memicu adrenalin dan ambisi Penulis agar menjadi lebih baik.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng., Bapak Feby Agung Pamuji, ST., MT., Ph.D, dan Mbak Talitha Puspita Sari selaku pembimbing yang telah memberikan waktu, ilmu, dan kesabarannya selama proses penyusunan penelitian.
5. Dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan bimbingan selama penulis menempuh pendidikan di Teknik Elektro ITS.
6. Rekan seperjuangan yaitu asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) serta angkatan e55 atas bantuan dan kebersamaan selama kuliah hingga penyusunan penelitian.
7. Sahabat setia ku Pradnya Paramitha, Fitri Mutia Aryani, Dhiandra Mughni, Risya Rahmasari Kosasih, Azka Nabilla, Bella Rineka Putri, Fortuna Oktavia, Cika Kalista Adinda, Risa Febriani yang telah menjadi wadah atas keluh kesah kehidupan ini.

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

Surabaya, Juni 2019

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
LEMBAR PENGESAHAN	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	vii
LEMBAR PENGESAHAN.....	ix
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR SIMBOL	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Perumusan Masalah.....	2
1.3.Batasan Masalah.....	2
1.4.Tujuan.....	2
1.5.Metodologi	3
1.6.Sistematika Penulisan	4
1.7.Relevansi	5
BAB 2 KESTABILAN TRANSIEN SISTEM TENAGA LISTRIK .	7
2.1.Kestabilan Sistem Tenaga Listrik.....	7
2.1.1.Kestabilan Sudut Rotor	8
2.2.Persamaan Ayuanan (<i>Swing Equation</i>)	10
2.3. <i>Critical Clearing Time (CCT)</i>	12
2.4.Lintasan Kritis (<i>Critical Trajectory</i>)	13
2.5. <i>Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)</i>	14
2.6. <i>Super Capacitor Energy Storage (SCES)</i>	14
BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN IMPLEMENTASI METODE	15
.....	15
3.1.Aliran Daya (<i>Power Flow</i>)	15
3.1.1.Metode Newton Raphson	18
3.1.2.Matriks Jacobian	19
3.2.Reduksi Matriks	21
3.3.Pemodelan Sistem	22
3.4.Metode Fungsi Energi	24
3.5.Metode Runge-Kutta (R-K).....	26

3.6. <i>Modified Trapezoidal Method</i>	28
3.7. <i>Modified Losing Synchronism Method</i>	30
3.8. <i>Boundary Controlling Unstable Equilibrium Point Shadowing Method</i>	34
3.9. Pemodelan <i>Super Capacitor Energy Storage</i> (SCES) di dalam Program.....	36
BAB 4 HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISIS HASIL	37
4.1. Penentuan Titik Gangguan pada Sistem	39
4.2. Analisis Aliran Daya melalui Metode Newton-Raphson	41
4.3. Reduksi Jaringan pada Sistem	49
4.4. Pemodelan <i>Pre-fault</i> dan <i>On-Fault</i> Sistem dengan Metode Runge-Kutta 4 th	50
4.5. Penentuan <i>Critical Generator</i>	52
4.6. Perhitungan <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) Sistem Tanpa SCES	56
4.6.1. Perhitungan Critical Clearing Time (CCT) Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Tanpa SCES	56
4.6.2. Perhitungan Critical Clearing Time (CCT) Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus Tanpa SCES	57
4.7. Perhitungan Critical Clearing Time (CCT) Sistem dengan SCES	58
4.7.1. Perhitungan Critical Clearing Time (CCT) Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus dengan SCES	58
4.7.2. Perhitungan <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus dengan SCES	62
BAB 5 PENUTUP	69
5.1. Kesimpulan	69
5.2. Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	71
BIOGRAFI PENULIS.....	73
LAMPIRAN	75
1) Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus	75
2) Reduksi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus	77
3) Karakteristik Kecepatan Sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) di Sistem 3-Generator 9-Bus dengan SCES	78
4) Karakteristik Kecepatan Sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) di Sistem 7-Generator 57-Bus dengan SCES	81

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	7
Gambar 2.2. Respons Sudut Rotor di Generator	9
Gambar 2.3. Lintasan Sistem Single Machine yang Terhubung dengan Infinite Bus	13
Gambar 3.1. Fungsi Satu Dimensi Non-linear	18
Gambar 3.2. Reduksi Sistem 3-Generator 9-Bus.....	21
Gambar 3.3. Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron Per-Fasa	24
Gambar 3.4. Ilustrasi Berbasiskan Metode Euler	26
Gambar 3.5. Metode Trapezoidal	28
Gambar 3.6. Arah Vektor Titik Inisial Selalu Menuju Kondisi Kritis.....	31
Gambar 4.1. Flowchart Optimasi Peletakan Super Capacitor Energy Storage (SCES).....	38
Gambar 4.2. Single Line Diagram Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	39
Gambar 4.3. <i>Single Line Diagram</i> Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus	40
Gambar 4.4. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-1 Sistem 3-Generator 9-Bus.....	60
Gambar 4.5. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-2 Sistem 3-Generator 9-Bus.....	61
Gambar 4.6. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-3 Sistem 3-Generator 9-Bus.....	61
Gambar 4.7. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-1 Sistem 7-Generator 57-Bus.....	65
Gambar 4.8. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-2 Sistem 7-Generator 57-Bus.....	65

Gambar 4.9. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-3 Sistem 7-Generator 57-Bus	66
Gambar 4.10. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-4 Sistem 7-Generator 57-Bus	66
Gambar 4.11. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-5 Sistem 7-Generator 57-Bus	67
Gambar 4.12. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-6 Sistem 7-Generator 57-Bus	67
Gambar 4.13. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-7 Sistem 7-Generator 57-Bus	68

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Coordination Time Interval[3]	12
Tabel 4.1. Data Transmisi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus[11]	41
Tabel 4.2. Data Tegangan dan Daya Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus[11].....	41
Tabel 4.3. Data Transmisi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus	42
Tabel 4.4. Data Tegangan dan Daya Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus	45
Tabel 4.5. Hasil Aliran Daya Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	47
Tabel 4.6. Admitansi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Sebelum Terjadi Gangguan	49
Tabel 4.7. Admitansi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Saat Terjadi Gangguan	49
Tabel 4.8. Admitansi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Setelah Terjadi Gangguan	50
Tabel 4.9. θCOI pada Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus.....	51
Tabel 4.10. Exit Point pada Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	51
Tabel 4.11. CUEP Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus	52
Tabel 4.12. CUEP Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus.....	53
Tabel 4.13. Indeks Energi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus.....	54
Tabel 4.14. Indeks Energi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus.....	54
Tabel 4.15. Indeks Energi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus (Lanjutan)	55
Tabel 4.16. Nilai CCT Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Tanpa SCES	56
Tabel 4.17. Nilai CCT Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus Tanpa SCES.....	57
Tabel 4.18. Nilai CCT Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus dengan SCES	58

Tabel 4.19. Perbandingan Nilai CCT Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus.....	59
Tabel 4.20. Nilai CCT Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus dengan SCES.....	62
Tabel 4.21. Perbandingan Nilai CCT Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus.....	63

DAFTAR SIMBOL

E_A	= Tegangan terinduksi di jangkar (<i>armature</i>)
V_θ	= Tegangan fasa generator
E_s	= Tegangan terbangkit di stator setelah terhubung dengan beban pada terminal generator.
X_s	= Reaktansi di stator akibat dari reaksi jangkar
$\delta_m = \delta_i$	= Sudut rotor (<i>rad</i>) generator ke- <i>i</i>
$\omega_m = \omega_i$	= Kecepatan rotor (<i>rad/s</i>) generator ke- <i>i</i>
$\omega_s = \omega_0$	= Kecepatan sinkron
M	= Konstanta inersia
J	= Momen inersia ($kg \cdot m^2$)
ω	= $d\delta/dt$
$\dot{\omega}$	= $d^2\delta/dt^2$
W_k	= Energi kinetik
D	= Redaman (<i>damping</i>)
x_{pre}	= Titik saat gangguan mulai terjadi di sistem
x_{exit}	= Titik akhir dari lintasan gangguan (<i>fault-on</i>)
x^0	= Titik inisial dari lintasan kritis
x^{m+1}	= Titik akhir dari lintasan kritis
*	= Konjugasi
$\tilde{\omega}$	= Selisih antara kecepatan rotor dengan kecepatan sinkron
δ_0	= <i>Center of Inertia/Angle (rad)</i>
Θ_i	= Selisih antara sudut rotor dengan COI
s	= <i>Stable Equilibrium Point (SEP)</i>
τ	= Waktu pemutusan gangguan (CCT)
\bar{v}	= <i>Eigenvector</i>
\hat{v}	= Vektor satuan
$ v $	= Besaran vektor
k_s	= Konstanta skalar
NGE	= Jumlah generator
E_P	= Energi potensial sebagai indeks pemilihan CG
m	= Konstanta untuk ketelitian (<i>time step</i>)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Meningkatnya kebutuhan listrik seiring kemajuan zaman membuat kehidupan sangat bergantung pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, operator diwajibkan untuk mempertahankan keandalan dan kestabilan sistem. Dimana, sistem tersebut mampu menyalurkan daya secara berkelanjutan. Fokus pembahasan pada evaluasi kestabilan ialah respons sudut rotor pada generator interkoneksi ketika sistem mengalami gangguan yang besar (transien) seperti hubung singkat pada saluran transmisi, lepasnya beban atau generator dari sistem[1].

Saat gangguan transien terjadi pada sistem tenaga listrik maka daya elektris P_e di setiap generator mengalami penurunan dibandingkan dengan daya mekanis P_m sehingga terjadi percepatan pada putaran rotor generator ($P_m > P_e$). Hal ini akan menyebabkan frekuensi elektris f_e yang dihasilkan pada stator tidak sebanding dengan kecepatan putaran rotor generator atau medan magnet putarnya (n_m)[2]. Fenomena tersebut akan menimbulkan sudut rotor δ_i dan merubah kondisi operasi sistem tenaga listrik dari kondisi normalnya.

Berdasarkan referensi [3], pemasangan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) telah terbukti membantu sistem dalam menjaga kestabilan sudut rotor. SCES merupakan alat penyimpanan energi berkapasitas tinggi yang akan menyerap daya mekanis berlebih dari *Critical Generator* (CG) saat sistem mengalami gangguan transien. Hal tersebut akan memberikan kesempatan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan sudut rotornya melalui perbaikan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) yang merupakan waktu kritis untuk pemutusan gangguan.

Penelitian ini akan membuktikan bahwa SCES akan memperbaiki CCT apabila diletakan pada lokasi yang tepat yaitu di bus CG. Penentuan CG akan didukung oleh metode *Boundary Controlling Unstable Equilibrium Point* (BCU) *Shadowing* berdasarkan perhitungan indeks energi terbesar di setiap generator pada gangguan tertentu[4]. Perhitungan CCT pada CG dilakukan dengan menggunakan metode *Critical Trajectory*. Dimana, metode tersebut akan memodelkan perilaku sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan hingga mencapai titik kritis sebelum

menuju kondisi akhir yaitu kehilangan sinkronisme pada generator (*modified losing synchronism*).

1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan utama dalam penelitian ini ialah penentuan *Critical Generator* (CG) pada sistem 3-generator 9-bus dan 7-generator 57-bus. Penetuan tersebut harus didasari dengan alasan yang kuat dikarenakan SCES akan mempengaruhi evaluasi kestabilan sistem terutama pada *Critical Clearing Time* (CCT) atau waktu pemutusan gangguan.

CCT hasil optimasi peletakan SCES harus dibandingkan dengan nilai CCT sebelumnya untuk membuktikan bahwa bus CG merupakan lokasi peletakan SCES yang sesuai untuk memperbaiki CCT sistem. Selain itu, respons sudut rotor dan kecepatan sudut harus diperhatikan di setiap generator.

1.3. Batasan Masalah

Penelitian akan dibatasi oleh hal-hal di bawah ini:

1. Penetuan *Critical Generator* (CG) hanya berdasarkan konsep pada metode BCU *Shadowing*.
2. Perbaikan CCT dilakukan dengan meletakkan satu buah *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) di bus CG dengan kapasitas 0.1 pu. Pembahasan SCES tidak meliputi karakteristik dari SCES seperti waktu *charging*, waktu *discharging*, *cycle life*, *specific energy* (Wh/kg), *specific power* kW/kg), *cycle efficiency* (%), dan harga. Di dalam pembahasan penelitian, SCES diasumsikan dalam keadaan kosong sehingga siap untuk menerima daya mekanis berlebih dari CG.
3. Perhitungan CCT hanya dilakukan pada CG Sitem 3-generator 9-bus dan 7-generator 57-bus tanpa SCES maupun dengan SCES.

1.4. Tujuan

Penelitian meliputi pembahasan mengenai metode BCU *Shadowing* untuk mendapatkan *Critical Generator* (CG) berdasarkan indeks energi atau penjumlahan seluruh bentuk energi yang ada di dalam generator. Penetuan CG dilakukan sebagai lokasi dalam peletakan Super

Capacitor Energy Storage (SCES) yaitu pada bus CG. Lalu, perhitungan CCT melalui metode *Critical Trajectory* untuk membuktikan bahwa peletakan SCES akan memperbaiki *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem 3-generator 9-bus dan 7-generator 57-bus.

1.5. Metodologi

Metodologi yang akan digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Penulis mempelajari berbagai dasar teori yang bersumber pada jurnal maupun buku sebagai landasan dalam penyusunan buku tugas akhir. Penulis mempelajari teori yang meliputi kestabilan transien, *Critical Clearing Time* (CCT), *Super Capacitor Energy Storage* (SCES), metode BCU *Shadowing*, dan metode *Critical Trajectory* (Ctrj).

2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data yang lengkap dan tepat dapat mencapai hasil simulasi yang sesuai. Data-data yang dibutuhkan ialah: data impedansi saluran, tegangan, daya, *Single Line Diagram* (SLD), titik gangguan pada sistem, MVA *base*, kapasitas kapasitor.

3. Pemodelan

Setelah dilakukan studi literatur dan pengumpulan data, tahap selanjutnya ialah memodelkan alur penggerjaan dalam bentuk *flowchart* dengan garis besar yaitu BCU *Shadowing* sebagai metode untuk menentukan CG dan metode Critical Trajectory ialah metode untuk perhitungan CCT.

4. Simulasi Program

Program disimulasikan dengan *software* MATLAB berdasarkan alur penggerjaan yang telah dibuat. Modifikasi program terletak pada persamaan ayunan yang melibatkan SCES sebagai penyerap daya mekanis berlebih dari *Critical Generator* (CG) saat sistem mengalami gangguan.

5. Analisis Data
Hasil akhir pada tahap simulasi akan dianalisis untuk mendapatkan kesimpulan.
6. Penulisan
Setelah mendapatkan hasil yang akurat dari proses analisis maka akan dilakukan penarikan kesimpulan serta penulisan buku tugas akhir.

1.6. Sistematika Penulisan

Buku tugas akhir memiliki lima bab yaitu:

BAB 1: PENDAHULUAN

Bab Satu merupakan penjelasan umum mengenai topik penelitian seperti Latar Belakang, Perumusan Masalah, Batasan Masalah, Tujuan, Metodologi, Sistematika penulisan, dan Relevansi.

BAB 2: KESTABILAN TRANSIEN SISTEM TENAGA LISTRIK

Bab Dua terdiri atas landasan teori mengenai Kestabilan Sistem Tenaga Listrik, Persamaan Ayunan (*Swing Equation*), *Critical Clearing Time* (CCT), *Critical Trajectory* (Ctrj), *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP), *Super Capacitor Energy Storage* (SCES).

BAB 3: PEMODELAN SISTEM DAN IMPLEMENTASI METODE

Bab Tiga membahas mengenai pemodelan X_d' generator pada sistem multimesin menggunakan konsep *Center of Inertia* (COI) atau *Center of Angle* (COA). Metode yang digunakan pada penelitian ini ialah Aliran Daya (*Power Flow*), Reduksi Matriks, Fungsi Energy (*Energy Function*), Runge-Kutta 4th, *Modified Trapezoidal*, *Modified Losong Synchronism*, BCU Shadowing.

BAB 4: SIMULASI DAN ANALISA DATA

Bab Empat meliputi hasil simulasi dari tiga metode utama yaitu Aliran Daya, BCU Shadwoing, dan *Critical Trajectory*. Kemudia, hasil tersebut dianalisis dan disesuaikan dengan tujuan utama yaitu optimasi peletakkan SCES dalam memerbaiki CCT sistem.

BAB 5: PENUTUP

Bab Lima merupakan kesimpulan yang diambil berdasarkan analisis pada Bab Empat dan saran yang ditunjukkan bagi peneliti selanjutnya.

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.

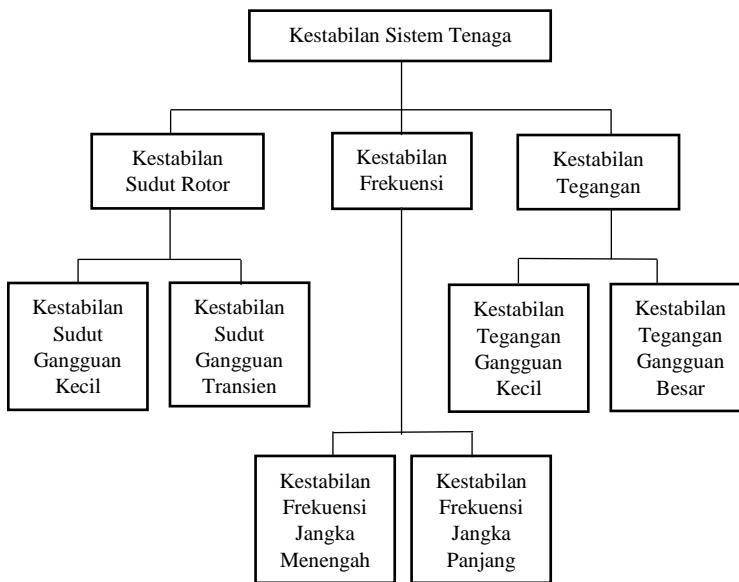
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KESTABILAN TRANSIEN SISTEM TENAGA LISTRIK

2.1. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan kemampuan sistem yang dapat mempertahankan kondisi stabil saat keadaan normal dan mendapatkan kembali kondisi tersebut setelah mengalami gangguan. Generator yang terpasang secara paralel atau interkoneksi harus beroperasi secara sinkron dengan tegangan dan frekuensi yang sama. Jenis-jenis kestabilan sistem tenaga listrik terdapat pada gambar 2.1. Namun pada penelitian ini, evaluasi kestabilan hanya terfokus pada respons sudut rotor generator ketika sistem mengalami gangguan transien.



Gambar 2.1. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

2.1.1. Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan generator interkoneksi dalam mempertahankan kondisi sinkronnya[1]. Namun, penurunan daya elektris saat sistem mengalami gangguan menjadi penyebab osilasi pada kecepatan putaran rotor.

Generator merupakan mesin listrik untuk mengonversikan daya mekanis P_m menjadi daya elektris P_e . Terdapat dua bagian penting pada generator yaitu medan (*field*) dan jangkar (*armature*). Medan terletak pada rotor sementara jangkar terletak pada stator. Suplai DC diberikan pada kumparan rotor dan menghasilkan medan magnet. Lalu, rotor diputar oleh *prime mover* (diesel, turbin uap, turbin air) sehingga menghasilkan medan magnet putar B_R dan menginduksi tegangan E_A di tiap fasa pada kumparan jangkar. Sinkronisme pada generator didefinisikan sebagai besarnya frekuensi elektris f_e yang dihasilkan berbanding lurus dengan kecepatan rotor n_m [2] sesuai persamaan di bawah ini:

$$f_e = \frac{n_m P}{120} \quad (2.1)$$

Besarnya E_A berbanding lurus dengan frekuensi elektris f_e yang dihasilkan.

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \emptyset f_e \quad (2.2)$$

Dimana,

f_e = frekuensi elektris (Hz)

n_m = kecepatan medan magnet putar (sama dengan kecepatan rotor generator) (r/min)

P = jumlah kutub

\emptyset = fluks magnetik

N_C = konstruksi mesin

Apabila generator dalam keadaan tidak berbeban maka tidak ada arus yang mengalir pada jangkar. Oleh karena itu, E_A sama dengan tegangan fasa V_\emptyset . Namun, saat beban *lagging* terhubung pada terminal generator, arus akan mengalir menuju kumparan jangkar dan membangkitkan tegangan stator E_{stat} .

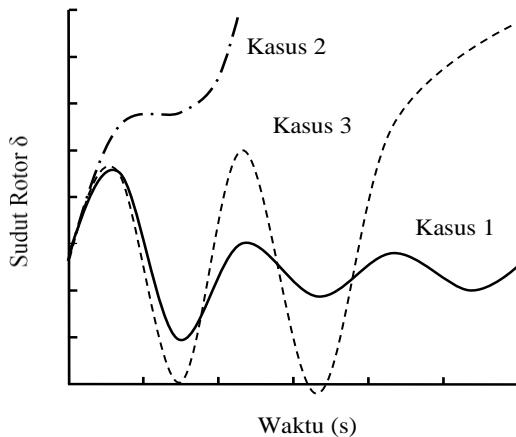
$$V_\emptyset = E_A + E_{stat} \quad (2.3)$$

Batas kestabilan pada generator berbanding lurus dengan daya maksimum.

$$P_{max} = \frac{3V\phi^{EA}}{x_s} \quad (2.4)$$

Gangguan pada sistem tenaga listrik terbagi menjadi dua yaitu gangguan kecil dan gangguan besar (transien). Gangguan kecil seperti perubahan beban secara terus-menerus namun sistem dapat menyesuaikan kondisi tersebut dan mampu mengirimkan daya maksimum menuju beban. Sementara, gangguan besar (transien) seperti hubung singkat pada saluran transmisi, lepasnya beban atau generator dari sistem.

Gambar 2.2 merupakan respons sudut rotor generator saat mengalami gangguan. Kasus Pertama, sudut rotor meningkat hingga mencapai nilai maksimum dan kembali pada kondisi *steady-state*. Kasus Kedua, sudut rotor terus-menerus meningkat hingga kehilangan sinkronnya. Kasus Ketiga, sudut rotor meningkat hingga mencapai nilai maksimum pada ayunan pertama dan kedua hingga akhirnya generator kehilangan sinkron saat ayunan ketiga (*multiswing instability*).



Gambar 2.2. Respons Sudut Rotor di Generator

2.2. Persamaan Ayuanan (*Swing Equation*)

Kondisi internal generator saat sistem mengalami gangguan akan dimodelkan dalam persamaan ayunan. Jika perubahan daya dapat dikontrol maka rotor kembali beroperasi pada kondisi awal. Namun, gangguan yang dapat mempengaruhi pembangkitan, beban, ataupun kondisi jaringan akan membuat rotor beroperasi pada kecepatan yang baru sehingga menimbulkan sudut rotor[5].

Torsi mekanis T_m merupakan torsi yang berasal dari *prime mover*. Sementara, torsi elektris T_e ialah torsi yang dihasilkan oleh generator dan beroperasi pada kecepatan yang sinkron ω_s . Persamaan (2.5) menunjukkan generator yang beroperasi saat kondisi *steady-state* dan rugi-rugi diabaikan.

$$T_m = T_e \quad (2.5)$$

Saat daya elektris mengalami penurunan maka terjadi perpindahan kondisi *steady-state* menuju percepatan ($T_m > T_e$) sehingga menimbulkan torsi T_a pada rotor.

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.6)$$

J merupakan kombinasi momen inersia dari *prime mover* dan generator dengan mengabaikan gesekan serta *damping* lalu didapatkan *Rotation's law*.

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

Dimana, $d\theta_m/dt$ merupakan kecepatan perputaran rotor dengan kecepatan sudut yang sinkron ω_s . Karena yang diperhatikan kecepatan relatif rotor pada kecepatan sinkron maka dibutuhkan referensi sudut pada referensi gerak berputar sinkron ω_m [5].

$$\theta_m = \omega_s t + \delta_m \quad (2.8)$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_s + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.9)$$

Percepatan sudut rotor:

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.10)$$

Substitusi persamaan (2.10) ke dalam persamaan (2.7).

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad (2.11)$$

Kalikan persamaan (2.11) dengan ω_m .

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_m - \omega_m T_e \quad (2.12)$$

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (2.13)$$

Dimana,

J = momen inersia dari keseluruhan massa yang berputar pada *shaft* ($kg \cdot m^2$)

δ_m = sudut rotor (*rad*)

T_a = torsi percepatan ($N \cdot m$)

$J\omega_m$ ialah konstanta inersia yang disimbolkan sebagai M memiliki hubungan dengan energi kinetik pada beban yang berputar W_k .

$$W_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2}M\omega_m^2 \quad (2.14)$$

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e \quad (2.15)$$

Apabila mempertimbangkan *damping* D maka persamaannya ialah:

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e - \frac{D}{\omega_s}\omega \quad (2.16)$$

2.3. Critical Clearing Time (CCT)

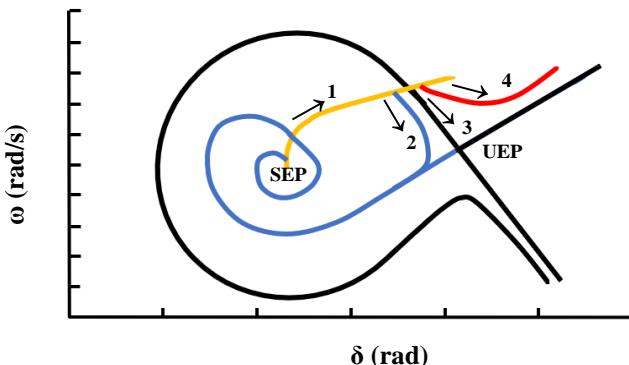
Transient Stability Assessment (TSA) merupakan hal yang penting dalam studi operasi dan perencanaan sistem tenaga listrik. Apabila sistem mengalami gangguan maka hal tersebut harus segera dihilangkan untuk menghindari kerusakan pada peralatan di sekitarnya dan menjaga stabilitas operasi mesin-mesin. Oleh karena itu, sistem membutuhkan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) sebagai batas kritis kestabilan. Selain itu, CCT juga dapat didefinisikan sebagai waktu maksimum sistem pengaman dapat beroperasi untuk memutus gangguan[3]. Apabila sistem pengaman dapat beroperasi sebelum nilai CCT maka sistem menjadi stabil. Namun, saat sistem proteksi beroperasi setelah nilai CCT maka sistem menjadi tidak stabil. *Circuit Breaker* (CB) merupakan alat untuk memutus gangguan. Sedangkan, rele sebagai penerima sinyal gangguan dan memerintahkan CB untuk beroperasi (*trip*). Dibawah ini merupakan waktu operasi dari CB:

Tabel 2.1. Coordination Time Interval[3]

Operasi	Tipe Rele	
	Statis	Elektromekanis
Waktu pembukaan CB	0.08 s	0.08 s
<i>Overtravel</i> rele	0.00 s	0.10 s
Toleransi rele dan error pengaturan	0.12 s	0.12 s
Total CTI	0.2 s	0.3 s

Pola pada tabel 2.1 tidak melibatkan CCT sehingga hal tersebut tidak menjamin pemulihan sistem untuk kembali beroperasi secara normal setelah terjadinya gangguan. Penentuan CCT mengacu pada respons sudut rotor apabila sistem mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa. Nilai CCT harus memiliki waktu yang lebih lama jika dibandingkan dengan waktu operasi CB. Sehingga, *setting* peralatan pengaman dengan mempertimbangkan nilai CCT dapat memperbaiki keandalan pada sistem pengaman.

2.4. Lintasan Kritis (*Critical Trajectory*)



Gambar 2.3. Lintasan Sistem *Single Machine* yang Terhubung dengan *Infinite Bus*

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*[6]. Metode *Critical Trajectory* yang digunakan akan menganalisis perilaku dari sistem tenaga listrik saat terjadi gangguan hingga gangguan tersebut diputus. **Lintasan pertama** merupakan lintasan ketika sistem mengalami gangguan (*fault-on*) hingga gangguan tersebut diputus pada waktu CCT. **Lintasan kedua** untuk kondisi sistem yang stabil sehingga setelah terjadi pemutusan gangguan, sistem kembali beroperasi pada daerah stabilnya yaitu *Stable Equilibrium Point* (SEP). **Lintasan ketiga** 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. Oleh karena itu, pada pembahasan berikutnya akan merumuskan kondisi *Controlling Unstable Equilibrium Point* (CUEP) yang merupakan kondisi titik akhir alternatif sebagai penyelesaian dari permasalahan di atas. **Lintasan keempat** adalah lintasan saat gangguan telat untuk diputus sehingga sistem kehilangan kestabilannya.

2.5. Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)

Akurasi pada evaluasi kestabilan transien dipengaruhi oleh pemilihan CUEP. Titik tersebut diperoleh berdasarkan *Unstable Equilibrium Point* (UEP) terbaik di setiap generator. Selain *modified losing synchronism*, CUEP juga merupakan kondisi titik akhir alternatif pada kasus sistem multimesin yang memenuhi persamaan berikut:

$$\delta^{m+1} = P(\delta^{m+1}) = 0 \quad (2.17)$$

$$P(\delta^{m+1}) = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{coi}(\theta) \quad (2.18)$$

Boundary Controlling Unstable Equilibrium Point (BCU) merupakan metode untuk mendapatkan CUEP dimulai dari pencarian titik inisial x^0 namun pencarian tersebut tidak selalu berhasil. Sehingga, metode tersebut dikembangkan menjadi metode BCU *Shadowing*[7]. Berbeda dengan metode BCU, metode ini akan mencari titik terdekat x^k dengan CUEP melalui komputasi Newton Raphson. Oleh karena itu, metode BCU *Shadowing* mampu untuk menentukan *Critical Generator* (CG) berdasarkan evaluasi energi kritis di titik CUEP.

2.6. Super Capacitor Energy Storage (SCES)

Super Capacitor Energy Storage (SCES) menyediakan kapasitas yang besar untuk menyimpan muatan listrik pada EDLC atau *Electric Double Layer Capacitor*. Energi yang disimpan pada SCES berbanding lurus dengan kerapatan energi atau *energy density*. Walaupun, SCES memiliki kerapatan energi lebih rendah jika dibandingkan dengan alat penyimpanan lain seperti baterai dan *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES). Namun, ia memiliki kerapatan daya (*power density*) yang tinggi 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[8].

SCES dan SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) merupakan alat penyimpan energi yang paling efektif dalam menyelesaikan permasalahan kestabilan transien. Namun, SMES memiliki harga yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan SCES. Sebab, SMES membutuhkan biaya untuk konstruksi kumparan yang memiliki peran penting dalam prinsip kerjanya.

BAB 3

PEMODELAN SISTEM DAN IMPLEMENTASI METODE

Peran *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) pada sistem serta implementasi di dalam program akan dijelaskan pada bab ini. Penyusunan penelitian meliputi beberapa metode yaitu Newton-Raphson, Jacobian, Reduksi Kron, Fungsi Energi, Runge-Kutta Orde ke-4, *Trapezoidal*, *Critical Trajectory*.

3.1. Aliran Daya (*Power Flow*)

Daya yang dihasilkan oleh unit pembangkit listrik akan dikirimkan pada beban yang telah terhubung dengan sistem. Sehingga, analisis aliran daya perlu dilakukan untuk mengetahui kondisi sistem saat beroperasi dengan normal. Oleh karena itu, analisis tersebut tidak dapat mengamati sistem saat mengalami gangguan namun dapat menjadi kondisi inisial sistem. Di bawah ini merupakan konversi impedansi saluran ke dalam admittansi:

$$\begin{aligned}
 Y_{ii} &= \frac{1}{Z_{ii}} = \frac{1}{R_{ii} + jX_{ii}} \times \frac{R_{ii} - jX_{ii}}{R_{ii} - jX_{ii}} = \frac{R_{ii} - jX_{ii}}{(R_{ii} + jX_{ii})(R_{ii} - jX_{ii})} \\
 &= \frac{R_{ii} - jX_{ii}}{R_{ii}^2 + X_{ii}^2} = \frac{R_{ii}}{R_{ii}^2 + X_{ii}^2} - J \frac{X_{ii}}{R_{ii}^2 + X_{ii}^2} \\
 Y_{ii} &= G_{ii} - JB_{ii}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Persamaan arus tiap bus:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots \\ \vdots & & \vdots & \ddots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

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

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij}V_j \tag{3.3}$$

Dimana,

$G_{ii} = |Y_{ii}| \cos \theta_{ii}$ adalah konduktansi

$B_{ii} = |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$ adalah suseptansi

Y_{ij} = admitansi salura antara bus i dan j

Y_{ii} = total admitansi yang terhubung pada bus i

Persamaan tegangan tiap bus:

Rectangular Form,

$$V_i = |V_i|(\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (3.4)$$

Hybrid Form,

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \quad (3.5)$$

Sebagian besar beban-beban pada sistem merupakan beban induktif yang akan mengkonsumsi daya aktif maupun daya reaktif. Beban induktif bersifat *lagging* dimana arus I akan tertinggal terhadap tegangan $V[5]$. Maka, daya kompleks dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} (P_i + jQ_i)^* &= V_i I_i^* \\ P_i - jQ_i &= V_i^* I_i \end{aligned} \quad (3.6)$$

Substitusi persamaan (3.3) ke dalam persamaan (3.6)

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad (3.7)$$

Persamaan daya aktif dan daya reaktif:

Polar Form

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

$$\begin{aligned}
P_i &= |V_i|^2 G_{ii} + \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \\
Q_i &= - \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij}) \\
Q_i &= -|V_i|^2 B_{ii} - \sum_i^n \sum_{j \neq i}^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{ij})
\end{aligned} \tag{3.9}$$

Rectangular Form

$$P_1 = \text{Real} \left\{ V_i^* \sum_i^n \sum_j^n V_j Y_{ij} \right\} \tag{3.10}$$

$$Q_1 = -\text{Imaginer} \left\{ V_i^* \sum_i^n \sum_j^n V_j Y_{ij} \right\} \tag{3.11}$$

Hybrid Form

Persamaan daya aktif (3.8) dapat dituliskan sebagai berikut:

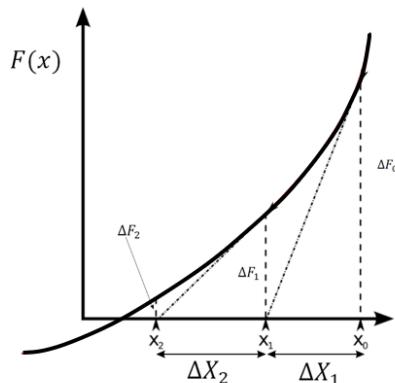
$$\begin{aligned}
P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos[-(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \\
P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos[(\delta_i - \delta_j) - (\theta_{ij})] \\
P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\cos(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) + \sin(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij})] \\
P_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\cos(\delta_i - \delta_j) G_{ij} + \sin(\delta_i - \delta_j) B_{ij}]
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Persamaan daya reaktif (3.9) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Q_i &= - \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin[-(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})] \\
 Q_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j Y_{ij}| \sin[(\delta_i - \delta_j) - (\theta_{ij})] \\
 Q_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\sin(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \cos(\theta_{ij}) + \cos(\delta_i - \delta_j) |Y_{ij}| \sin(\theta_{ij})] \\
 Q_i &= \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\sin(\delta_i - \delta_j) G_{ij} + \cos(\delta_i - \delta_j) B_{ij}] \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

3.1.1. Metode Newton Raphson

Daya yang mengalir pada bus akan dimodelkan dalam persamaan aljabar *non-linear* dan diselesaikan dengan metode iterasi Newton Raphson.



Gambar 3.1. Fungsi Satu Dimensi Non-linear

Fungsi *non-linear* satu dimensi:

$$f(x) = 0$$

Pendekatan *linear* menghasilkan deret *Taylor*.

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x_0) + \frac{1}{1!} \frac{df(x_0)}{dx}(x - x_0) + \frac{1}{2!} \frac{d^2f(x_0)}{dx^2} + \\ &\dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_0)}{dx^n} \\ f(x) &= f(x_0) + \frac{df(x_0)}{dx}(x - x_0) = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Fungsi *non-linear* dua dimensi:

$$f_1(x_1, x_2) = 0 \text{ dan } f_2(x_1, x_2) = 0 \quad (3.15)$$

Di bawah ini merupakan penyelesaian fungsi *non-linear* dua dimensi pada proses iterasi:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Penerapan metode Newton-Raphson pada sistem multimesin dapat dilakukan melalui proses iterasi persamaan (3.12) dan (3.13).

3.1.2. Matriks Jacobian

Persamaan akan ditulis sejumlah bus swing (slack), beban, dan generator. Namun, bus swing memiliki besaran V dan sudut θ tegangan yang konstan sehingga dihilangkan dari total n bus karena tidak perlu terlibat dalam proses perhitungan. Matriks Jacobian dituliskan seperti di bawah ini:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial V_n} \\ \vdots & J_{11} & \vdots & \vdots & J_{12} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial V_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_n} \\ \vdots & J_{21} & \vdots & \vdots & J_{22} & \vdots \\ \frac{\partial -1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta V_1}{|V_1|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_n}{|V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ J_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Elemen-elemen pada matriks Jacobian yang telah disederhanakan ialah:

1. Perubahan daya aktif P terhadap sudut rotor δ

$$H_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_i \quad (3.19)$$

2. Perubahan daya aktif P terhadap tegangan V

$$N_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n |V_i| \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (3.20)$$

3. Perubahan daya reaktif Q terhadap sudut rotor δ

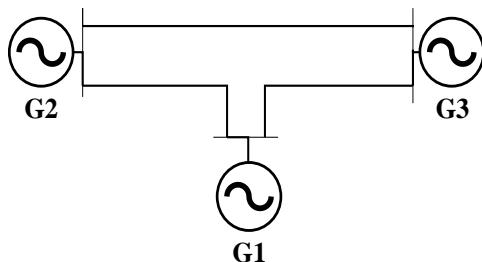
$$J_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_i \quad (3.21)$$

4. Perubahan daya reaktif Q terhadap tegangan V

$$L_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n |V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (3.22)$$

3.2. Reduksi Matriks

Analisis kestabilan transien pada sistem yang besar dan konfigurasi jaringan yang rumit membutuhkan cara untuk menyederhanakan jaringan agar lebih mudah dalam mendeteksi kondisi sistem setelah terjadi gangguan. G. Kron mengusulkan suatu teknik untuk menyederhanakan jaringan melalui metode *Node Elimination* atau biasa disebut dengan Reduksi Kron.



Gambar 3.2. Reduksi Sistem 3-Generator 9-Bus

Gambar 3.2 merupakan hasil reduksi sistem 3-generator 9-bus menjadi sistem 3-generator dengan menyisakan 3-bus yang disuplai langsung oleh tegangan terminal generator. Metode reduksi mengeleminasi admittansi yang tidak terhubung langsung dengan generator sehingga membuat jumlah i -bus sama dengan jumlah n -generator. Arus akan mengalir pada jaringan apabila terpasang dengan beban eksternal misalnya motor sinkron ataupun terhubung dengan unit pembangkit lain. Proses reduksi menghasilkan tiga rangkaian ekivalen yaitu sebelum terjadi gangguan (*pre-fault*), saat terjadi gangguan (*on-fault*), dan setelah terjadi gangguan (*post-fault*)[5].

Asumsi, bus 3 pada sistem tidak terhubung oleh generator maka

$$\begin{aligned} I_3 &= 0 \\ Y_{31}V_1 + Y_{32}V_2 + Y_{33}V_3 &= 0 \\ V_3 &= -\frac{Y_{31}}{Y_{33}}V_1 - \frac{Y_{32}}{Y_{33}}V_2 \end{aligned} \quad (3.23)$$

Substitusi persamaan (3.23) ke dalam persamaan (3.24) dan (3.25).

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + Y_{13}V_3 \\ I'_1 &= \left(Y_{11} - \frac{Y_{13}Y_{31}}{Y_{33}}\right)V_1 + \left(Y_{12} - \frac{Y_{13}Y_{32}}{Y_{33}}\right)V_2 \end{aligned} \quad (3.24)$$

$$\begin{aligned} I_2 &= Y_{12}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 \\ I'_2 &= \left(Y_{21} - \frac{Y_{23}Y_{31}}{Y_{33}}\right)V_1 + \left(Y_{22} - \frac{Y_{23}Y_{32}}{Y_{33}}\right)V_2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

Maka, persamaan (3.24) dan (3.25) disederhanakan menjadi,

$$Y_{BUS}(\text{Reduksi}) = \begin{bmatrix} Y'_{11} & Y'_{12} \\ Y'_{21} & Y'_{22} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Dimana,

$$Y'_{11} = Y_{11} - \frac{Y_{13}Y_{31}}{Y_{33}} ; \quad Y'_{12} = Y'_{21} = Y_{12} - \frac{Y_{13}Y_{32}}{Y_{33}} ; \quad Y'_{22} = Y_{22} - \frac{Y_{23}Y_{32}}{Y_{33}}$$

Reduksi Kron untuk eliminasi bus n dirumuskan sebagai berikut:

$$Y_{ij}^{new} = Y_{ij}^{old} - \frac{Y_{ik}Y_{ki}}{Y_{kk}} \quad (3.27)$$

3.3. Pemodelan Sistem

Sistem terdiri dari n -generator dengan *Center of Angle* (COA) atau *Center of Inertia* (COI) sebagai referensi sudutnya. Sebab, pada penelitian ini sistem dianggap tidak memiliki *infinite bus*. COI merupakan sudut yang berasal dari nilai rata-rata berat inersia dari semua sudut rotor dan disimbolkan sebagai δ_0 [4]. Berbeda dengan *infinite bus* yang memiliki

sudut tegangan yang konstan yaitu bernilai nol. COI memiliki nilai yang berubah-ubah. Rumus COA/COI:

$$M_T \delta_0 = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.28)$$

Persamaan derivatif:

$$M_T \dot{\omega}_0 = \sum_{i=1}^n M_i \dot{\omega}_i \quad (3.29)$$

Dimana: $\dot{\delta}_i = \omega_i$ dan $\ddot{\delta}_i = \dot{\omega}_i$

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

$$M_T \dot{\omega}_0 = \sum_{i=1}^n (P_{m_i} - E_i^2 G_{ii}) - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j G_{ij} \cos \delta_{ij} \quad (3.31)$$

Sudut terbaru dan kecepatan relatif terhadap referensi COI:

$$\theta_i = \delta_i - \delta_o \text{ dan } \tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_o \quad (3.32)$$

Sehingga didapatkan persamaan ayunan sebagai berikut:

$$M_i (\dot{\tilde{\omega}}_i + \dot{\omega}_i) = P_{m_i} - P_{ei}(\theta) - D_i(\tilde{\omega}_i)$$

$$M_i \dot{\tilde{\omega}}_i = P_{m_i} - P_{ei}(\theta) - M_i \dot{\omega}_i - D_i(\tilde{\omega}_i)$$

$$M_i \dot{\tilde{\omega}}_i = P_{m_i} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(\theta) - D_i(\tilde{\omega}_i) \quad (3.33)$$

P_{mi} = daya mekanis pada generator i

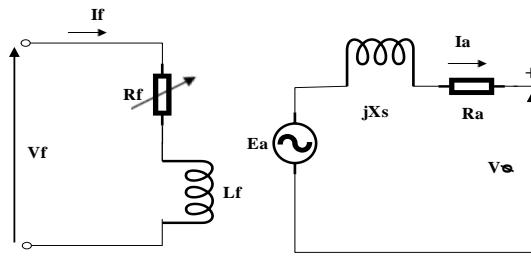
P_{ei} = daya elektris pada generator i

M_i = momen inersia pada generator i

M_T = inersia total dari semua generator pada sistem

ω_i = kecepatan sudut rotor generator i

δ_i dan θ_i = sudut rotor generator i



Gambar 3.3. Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron Per-Fasa

Pemodelan generator seperti rangkaian ekivalen akan mempermudah perhitungan tegangan internal generator E_A dan sudut daya. Perhitungan dilakukan dengan mengabaikan reaksi jangkar pada stator:

$$V_\theta = E_A - R_A I_A \quad (3.34)$$

Dimana, $E_a = |E_a| \angle \delta$

3.4. Metode Fungsi Energi

Fungsi energi merupakan gabungan dari perubahan beberapa energi pada generator yaitu energi kinetik, energi potensial, energi magnetik serta energi disipasi namun dalam hal ini energi disipasi dapat diabaikan karena tidak dapat dihitung[9].

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \hat{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^S)$$

$$-\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij} (\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^S) - \int_{\theta_i^S + \theta_j^S}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (3.35)$$

Persamaan (3.35) terdiri dari empat persamaan perubahan energi yaitu:

1. Perubahan Energi Kinetik Rotor

$$V_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \hat{\omega}_i^2 \quad (3.36)$$

2. Perubahan Energi Potensial Rotor

$$V_p = \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i - \theta_i^S) \quad (3.37)$$

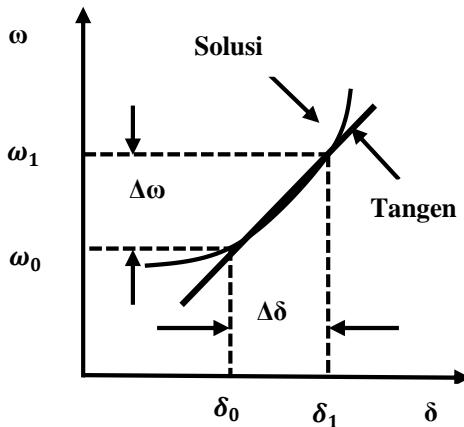
3. Perubahan Energi Magnetik yang Tersimpan

$$V_m = - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j B_{ij} (\cos(\theta_i - \theta_j) - \cos(\theta_{ij} - \theta_{ij}^S)) \quad (3.38)$$

4. Perubahan Energi Disipasi

$$\int_{\theta_i^S + \theta_j^S}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \quad (3.39)$$

3.5. Metode Runge-Kutta (R-K)



Gambar 3.4. Ilustrasi Berdasarkan Metode Euler

Metode Runge-Kutta merupakan salah satu metode integrasi numerik yang digunakan pada metode *Critical Trajectory* untuk menyelesaikan persamaan diferensial dua dimensi. Dimana, persamaan tersebut akan mewakili setiap generator.

$$\frac{d\omega}{d\delta} = f(\dot{\omega}, \dot{\delta})$$

Metode ini sebagai penyempurnaan dari Deret Taylor yang memiliki kerumitan dalam penggunaannya[1]. Metode Runge-Kutta dibagi menjadi beberapa orde berdasarkan jumlah proses pengerjannya.

Metode Runge Kutta orde dua (*second-order R-K*)

Rumus orde kedua digunakan untuk mencari nilai ω_1 pada $\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta$

$$\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega = \omega_0 + \frac{k_1 + k_2}{2}$$

$$k_1 = f(\omega_0, \delta_0)\Delta\delta$$

$$k_2 = f(\omega_0 + k_1, \delta_0 + \Delta\delta)\Delta\delta$$

Rumus umum untuk mencari nilai ω dengan langkah (*step*) $(n + 1)^{st}$ sebagai berikut:

$$\omega_{n,1} = \omega_n + \frac{k_1 + k_2}{2} \quad (3.40)$$

Dimana,

$$k_1 = f(\omega_n, \delta_n)\Delta\delta \quad (3.41)$$

$$k_2 = f(\omega_n + k_1, \delta_n + \Delta\delta)\Delta\delta \quad (3.42)$$

Metode Runge- Kutta orde empat (*fourth-order R-K*)

Metode *Critical Trajectory* menggunakan metode Runge-Kutta orde empat dengan *time step* sebesar 0.001 detik untuk medeterminasi lintasan *pre-fault*, *on-fault*, dan menyelesaikan persamaan differensial yang terkadung pada tiap titik pada lintasan kritis.

$$\omega_{n+1} = \omega_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.43)$$

Dimana,

$$k_1 = f(\omega_n, \delta_n)\Delta t \quad (3.44)$$

$$k_2 = f(\omega_n + \frac{k_1}{2}, \delta_n + \frac{\Delta\delta}{2})\Delta\delta \quad (3.45)$$

$$k_3 = f(\omega_n + \frac{k_2}{2}, \delta_n + \frac{\Delta\delta}{2})\Delta\delta \quad (3.46)$$

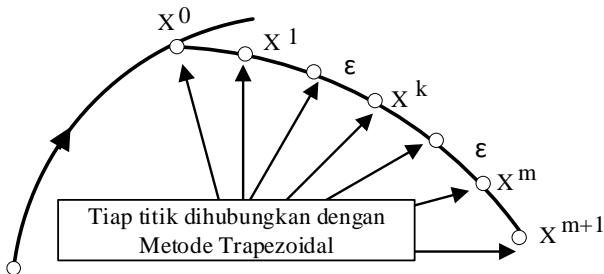
$$k_4 = f(\omega_n + k_3, \delta_n + \Delta\delta)\Delta\delta \quad (3.47)$$

Keterangan:

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

3.6. Modified Trapezoidal Method

Berdasarkan pembahasan pada sub-bab (2.4), lintasan kritis merupakan himpunan titik x^k dengan $k=0$ hingga $m+1$. Maka, metode Trapezoidal akan menghubungkan titik-titik tersebut.



Gambar 3.5. Metode Trapezoidal

Perumusan masalah

Mula-mula, sistem tenaga listrik beroperasi dengan stabil x_{pre} . Kemudian, gangguan mulai terjadi pada $t = 0$ dan menimbulkan respons terhadap perubahan dinamisnya selama $[0, \tau]$.

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

Lintasan *fault-on* dengan τ sebagai waktu pemutusan gangguan.

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.49)$$

Sistem dijelaskan secara dinamis setelah terjadi gangguan dengan persamaan *non-linear*.

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \quad (3.50)$$

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty \quad (3.51)$$

Kondisi Batasan (*Boundary Condition*)

Sehingga, respons dinamis sistem terhadap gangguan dapat dirumuskan seperti di bawah ini:

$$x^o = X_F(\tau; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \text{ atau } x^o = X_F(CCT; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.52)$$

x^o dan x^u merupakan titik awal dan titik kritis pada CCT, sementara k menyatakan bilangan yang akan bergerak seiring perubahan waktu.

Notasi x^k berasal dari waktu t^k yang berada pada rumus *Trapezoidal* konvensional yaitu:

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.53)$$

Dimana,

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.54)$$

Jarak antara dua titik (ε) didefinisikan sebagai berikut:

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k| (t^{k+1} - t^k) \quad (3.55)$$

Durasi waktu yang digantikan dengan jarak ialah

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.56)$$

Substitusi persamaan (3.55) kedalam persamaan (3.52) sehingga menghasilkan rumus modifikasi *Trapezoidal*[6].

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.57)$$

Least Square Minimization

Kestabilan sistem tenaga listrik dimodelkan dalam persamaan *least square* yang rumit sehingga membutuhkan metode penyelesaian yaitu dengan mengurangi persamaan yang berlebih. Persamaan simultan merupakan persamaan yang memiliki jumlah variabel yang sama dengan total persamaannya. Sementara, persamaan *least square* tidak memiliki total persamaan yang sama dengan jumlah variabelnya.

$$G(x) \begin{cases} x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \\ x^o = X_F(CCT; x_{pre}) = 0 \\ \text{end point condition} \end{cases} \quad (3.58)$$

Dengan variable sebagai berikut

$$X = (x^0, x^1, \dots, x^m, x^{m+1}, \varepsilon, \tau)$$

ε ditentukan secara otomatis apabila langkah integrasi m telah ditentukan. Langkah integrasi akan mempengaruhi keakuratan dan waktu simulasi[4].

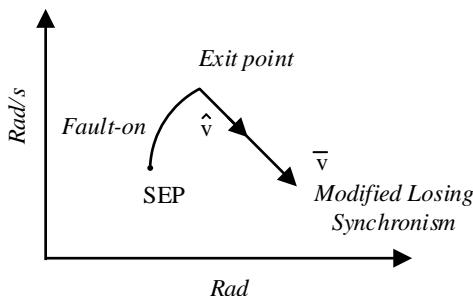
3.7. Modified Losing Synchronism Method

Metode *Critical Trajectory* digunakan untuk mendapatkan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT). Lintasan kritis merupakan lintasan yang berasal dari *initialpoint* hingga *endpoint* dan dihubungkan oleh epsilon ε melalui metode Modifikasi Trapezoidal.

Metode ini merupakan metode *Losing Synchronism* yang telah dimodifikasi pada kondisi kritisnya. Sistem *single machine* memiliki lintasan kritis yang konvergen dengan *Unstable Equilibrium Point* (UEP) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3. Sementara, hal tersebut tidak bisa menjadi pendasaran bagi sistem multimesin.

Modifikasi Kondisi Kritis

Metode ini akan mengusulkan penyelesaian dari permasalahan diatas dan menganggap bahwa vektor dari *exit point* pada lintasan gangguan selalu searah dengan kondisi titik akhir (*losing synchronism*).



Gambar 3.6. Arah Vektor Titik Inisial Selalu Menuju Kondisi Kritis

Dimana, vektor satuan \hat{v} didapatkan dari pembagian antara panjang vektor dengan besar vektor $|v|$.

$$\hat{v} = \frac{\bar{v}}{|v|} \quad (3.59)$$

Dibawah ini merupakan persamaan dari rotor generator saat kondisi kritis \dot{P} dengan P sebagai daya dan torsi T .

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \quad (3.60)$$

Kemudian, penyelesaian dari permasalahan sistem multimesin diperluas menggunakan kondisi singularitas pada matriks bujur sangkar.

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot \bar{v} \text{ dengan } |\bar{v}| \neq 0 \quad (3.61)$$

$\bar{v} \in R^{N_{Gen}}$ ialah *eigenvector* pada matriks $[\partial P / \partial \theta] \in R^{N_{Gen} \times N_{Gen}}$ dengan N_{Gen} sebagai jumlah generator. Dimana, *eigenvector* \bar{v} berbanding lurus terhadap perubahan sudut rotor θ .

$$\bar{v} = k_s \cdot \hat{\theta} \quad (3.62)$$

Pada metode termodifikasi, vektor *exit point* selalu searah dengan kondisi *losing synchronism* bedasarkan konstanta skalar k_s yang dianggap bernilai satu sehingga,

$$\bar{v} = \dot{\theta} \quad (3.63)$$

Maka persamaan sudut rotor didapatkan sebagai berikut:

$$\dot{P} = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \dot{\theta} \quad (3.64)$$

Di bawah ini merupakan rumusan masalah yang harus diselesaikan untuk mendapatkan kondisi kritis. (kecepatan simulasi $\max |dx| \leq 0.01$ detik)

$$\begin{aligned} & \min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, k_s, v} \left\{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)'(\mu^k) + (\mu^{m+1})'W(\mu^{m+1}) \right\} \\ & \mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \end{aligned} \quad (3.65)$$

W adalah matriks $m \times m$ atau berbentuk bujur sangkar dengan diagonal yang bernilai positif. Lalu, μ^k memiliki nilai yang ideal yaitu nol berdasarkan persamaan (3.56) pada metode Modifikasi Trapezoidal. Metode modifikasi telah mereduksi sebanyak $2*N_{Gen}$ persamaan sehingga kondisi batas menjadi,

$$\begin{aligned} x^0 &= X_F(\tau; x_{pre}) \\ \mu^{m+1} &= \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \bar{v} \end{aligned} \quad (3.66)$$

Matriks Jacobian untuk Kondisi Kritis

$$\begin{aligned} P^{m+1} &= Pm_i^{m+1} - Pe_i^{m+1}(\theta) \\ &= Pm_i^{m+1} - \sum_{j=i}^n Y_{ij}^{m+1} E_l^{m+1} E_j^{m+1} \cos(-\theta_i^{m+1} + \theta_j^{m+1} + \alpha_{ij}^{m+1}) \\ &= Pm_i^{m+1} - \sum_{j=1}^{NG} \left[Y_{ij}^{m+1} E_l^{m+1} E_j^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1} - \theta_j^{m+1}) \cos(\alpha_{ij}^{m+1}) + \right. \\ &\quad \left. Y_{ij}^{m+1} E_l^{m+1} E_j^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1} - \theta_j^{m+1}) \sin(\alpha_{ij}^{m+1}) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= Pm_i^{m+1} - \sum_{j=1}^{NG} [G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin(\theta_i^{m+1} - \theta_j^{m+1}) \\
&\quad + B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos(\theta_i^{m+1} - \theta_j^{m+1})] \\
&= Pm_i^{m+1} - G_{ij}^{m+1} (E_i^{m+1})^2 \\
&\quad - \sum_{i=1}^{NG} \sum_{j \neq i}^{NG} [G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin \theta_{ij}^{m+1} \\
&\quad + B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos \theta_{ij}^{m+1}] \tag{3.67}
\end{aligned}$$

$$J1 = \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} v = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1^{m+1}}{\partial \theta_1^{m+1}} & \dots & \frac{\partial P_1^{m+1}}{\partial \theta_{NGE}^{m+1}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{NG}^{m+1}}{\partial \theta_1^{m+1}} & \dots & \frac{\partial P_{NG}^{m+1}}{\partial \theta_{NGE}^{m+1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_{NGE} \end{bmatrix} \tag{3.68}$$

Dimana,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} &= - \sum_{j=1}^{NG} [G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin \theta_{ij}^{m+1} - B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos \theta_{ij}^{m+1}] \\
\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} &= [G_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \sin \theta_{ij}^{m+1} - B_{ij}^{m+1} E_i^{m+1} E_j^{m+1} \cos \theta_{ij}^{m+1}] \\
\frac{\partial J1}{\partial \theta} &= \frac{\partial J1}{\partial \theta} + \frac{\partial J1}{\partial v} \\
\frac{\partial J1}{\partial \theta} &= \frac{\partial (\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}})}{\partial \theta^{m+1}} v; i = 1, 2, \dots, NGE \\
\frac{\partial J1}{\partial v} &= \frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \tag{3.69}
\end{aligned}$$

3.8. Boundary Controlling Unstable Equilibrium Point Shadowing Method

Metode BCU *Shadowing* merupakan pendekatan untuk memperoleh CUEP yang tepat dari banyaknya UEP[10]. Sebab, pemilihan CUEP sangat berpengaruh terhadap hasil analisis kestabilan transien. Metode ini mengadopsi rumusan masalah yang ada pada metode *Critical Trajectory* dengan tujuan untuk evaluasi indeks energi pada CUEP. Setelah gangguan terjadi pada sistem tenaga listrik, konduktansi G_{ij} akan bernilai nol[7] sehingga menghasilkan indeks energi sebagai berikut:

$$P_i(\theta) = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(\theta)$$

$$P_i(\theta) = P_{mi} - G_{ii}E_i^2 - E_i E_j \sin(\delta_i - \delta_j)$$

Nilai indeks energi di tiap generator dijadikan sebagai parameter untuk pemilihan *Critical Generator* (CG). Superscript s mewakili *Stable Equilibrium Point* (SEP). Generator yang memiliki nilai indeks energi terbesar akan dipilih menjadi CG sistem[4].

$$E_{pi} = \sum_i E_{pi}$$

$$E_{pi} = \sum_{i=1}^n P_i(\theta_i - \theta_i^s) = \sum_{i=1}^n P_i(\delta_i - \delta_i^s) - \sum_{i=1}^n P_i(\delta_0 - \delta_0^s) \quad (3.70)$$

Di bawah ini merupakan rumusan masalah pada metode BCU *Shadowing*.

$$\min_X S(X) = \mu(X)^T \cdot \mu(X) = \sum_{k=0}^{m+1} |\mu^k|^2 \quad (3.71)$$

$$X = [\delta^1, \delta^2, \dots, \delta^{m+1}, \varepsilon]^T$$

$$\mu(X) = \begin{pmatrix} \mu^1 \\ \vdots \\ \mu^{k-1} \\ \mu^k \\ \mu^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta^1 - \delta^{exit} - \frac{\dot{\delta}^1 + \dot{\delta}^{exit}}{|\dot{\delta}^1 + \dot{\delta}^{exit}|} \varepsilon \\ \vdots \\ \delta^m - \delta^{m-1} - \frac{\dot{\delta}^m + \dot{\delta}^{m-1}}{|\dot{\delta}^m + \dot{\delta}^{m-1}|} \varepsilon \\ \delta^{m+1} - \delta^m - \frac{\dot{\delta}^m}{|\dot{\delta}^m|} \varepsilon \\ P(\delta^{m+1}) \end{pmatrix} \quad (3.72)$$

$$\dot{\delta}^{exit} = P(\delta^{exit}), \quad \dot{\delta}^k = P(\delta^k)$$

Metode Newton Raphson digunakan sebagai penyelesaian kondisi akhir dan untuk memperoleh CUEP.

$$J \equiv \frac{\partial \mu(X)}{\partial X} \quad (3.73)$$

$$\frac{\partial S}{\partial X} = 2J^T \mu(X) \approx 2J^T(J\Delta X + \mu(X_0)) = 0$$

$$J^T J \Delta X + J^T \mu(X_0) = 0$$

Penyelesaian ΔX akan menghasilkan CUEP δ^{m+1} yang akurat dan diwakilkan sebagai X .

$$X = X_0 + \Delta X \quad (3.74)$$

Untuk mendapatkan titik inisial yang baik pada lintasan kritis maka,

$$\delta^k = \delta^{exit} + k \cdot \varepsilon \cdot \hat{v}, \quad k = 1, \dots, m+1 \quad (3.75)$$

Dimana,

$$\varepsilon_{(jarak)} = \frac{c}{m} (c = 1 recommended)$$

\hat{v} = vektor satuan

m = variabel yang berhubungan dengan *time step*

3.9. Pemodelan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) di dalam Program

Persamaan ayunan 2.16 mewakilkan kondisi rotor generator ketika sistem mengalami gangguan. Namun, pada penelitian ini sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus serta sistem IEEE 7-generator 57-bus dianggap tidak memiliki *infinite bus*. Oleh karena itu, persamaan ayunan 3.33 meliputi *Center of Inertia* (COI) sebagai referensi sudut untuk setiap generator pada sistem.

Pada evaluasi kestabilan sudut rotor, *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) berperan sebagai beban tambahan pada sistem sehingga dapat menyerap daya mekanis yang berlebih dari *Critical Generator* (CG).

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{m_i} - P_{ei}(\theta) - P_{SCES} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI}(\theta) \quad (3.76)$$

Pada penelitian ini, kapasitas SCES telah ditentukan sebesar 0.1 pu dengan MVA *base* sebesar 100 MVA.

$$P_{SCES(pu)} = \frac{MVA_{SCES}}{MVA_{Base}} \quad (3.77)$$

SCES dapat diletakkan pada bus generator maupun bus beban. Namun pada penelitian ini, peletakan SCES dilakukan pada salah satu bus generator yaitu generator kritis. Sebab, bus tersebut tidak menjadi sasaran dalam proses reduksi jaringan.

BAB 4

HASIL PERHITUNGAN DAN ANALISIS HASIL

Simulasi dilakukan untuk mendapatkan hasil serta analisisnya. Pertama, metode BCU *Shadowing* dijalankan untuk menentukan *Critical Generator* (CG) di sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus dan sistem IEEE 7-generator 57-bus. CG dipilih berdasarkan konsep perhitungan indeks energi tiap generator. Optimasi peletakan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) dilakukan dengan meletakkan SCES di bus CG dan mengujinya di beberapa titik gangguan. CG yang didapat menjadi salah satu *input* pada metode berikutnya yaitu metode *Critical Trajectory* dengan *modified losing synchronism* sebagai kondisi titik akhir. Metode tersebut digunakan untuk perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) sebagai waktu kritis sistem pengaman dalam memutus gangguan. Proses perhitungan CCT dilakukan pada sistem yang tidak diletakkan SCES dengan sistem yang diletakkan SCES. Setelah hasil perhitungan CCT didapatkan lalu hasil tersebut dibandingkan untuk mengetahui seberapa besar penambahan nilai CCT serta respons yang diberikan oleh masing-masing generator setelah dilakukan pemutusan gangguan saat CCT sistem. *Flowchart* pada gambar 4.1 menunjukkan secara rinci tahap pengerjaan pada penelitian ini.

Kondisi dan spesifikasi perangkat keras akan mempengaruhi waktu simulasi BCU *Shadowing* dan *Critical Trajectory* untuk mencapai hasil akhir.

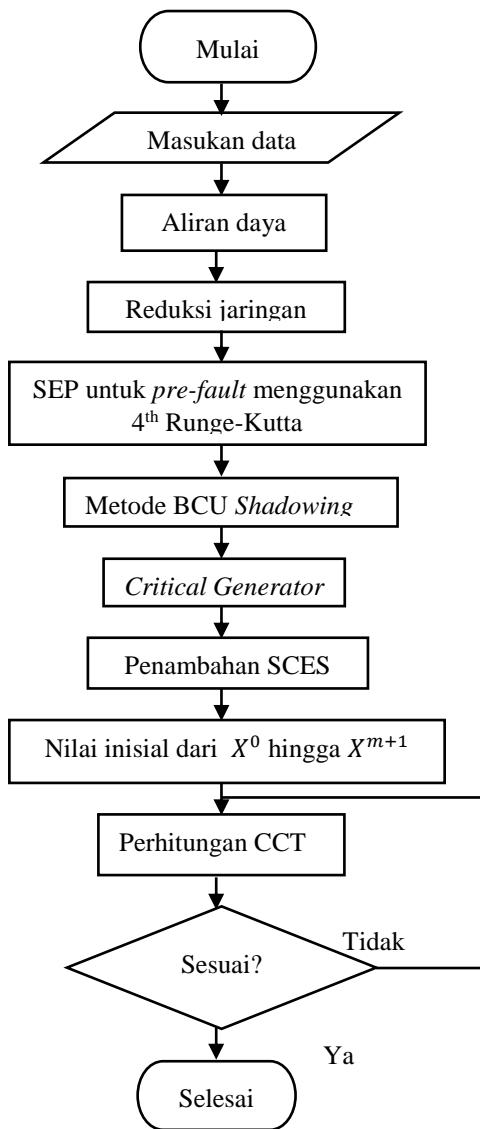
Processor: Intel® Core™ i5-3317U CPU @ 1.70 Ghz 1.70 GHz

Installed RAM: 4.00 GB

System type: 64-bit operating system, x64-based processor

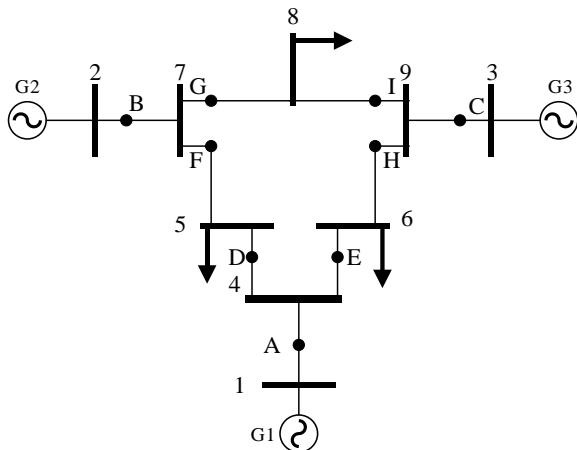
Windows edition: Windows 10 Pro

Matlab: R2017b



Gambar 4.1. Flowchart Optimasi Peletakan Super Capacitor Energy Storage (SCES)

4.1. Penentuan Titik Gangguan pada Sistem



Gambar 4.2. Single Line Diagram Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

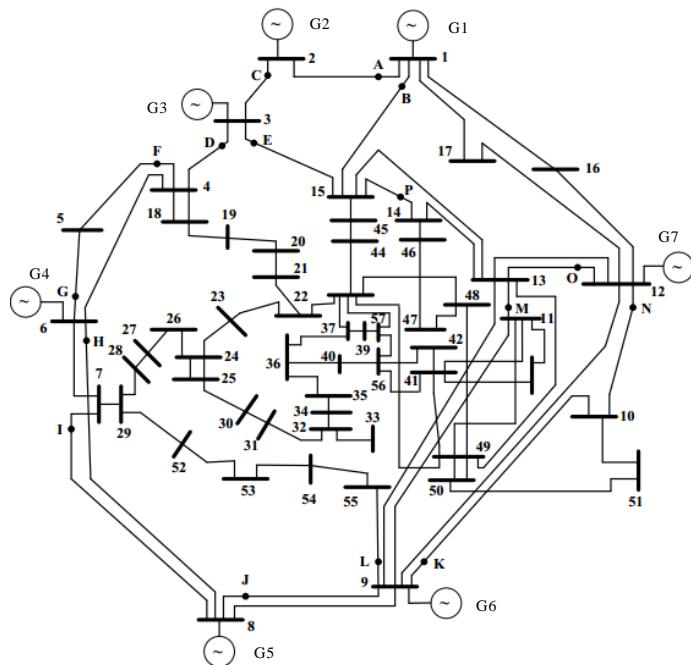
Titik gangguan sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus:

1. Titik A : Letak gangguan antara bus 1 dan bus 4
2. Titik B : Letak gangguan antara bus 2 dan bus 7
3. Titik C : Letak gangguan antara bus 3 dan bus 9
4. Titik D : Letak gangguan antara bus 4 dan bus 5
5. Titik E : Letak gangguan antara bus 4 dan bus 6
6. Titik F : Letak gangguan antara bus 7 dan bus 5
7. Titik G : Letak gangguan antara bus 7 dan bus 8
8. Titik H : Letak gangguan antara bus 9 dan bus 6
9. Titik I : Letak gangguan antara bus 9 dan bus 8

Titik gangguan sistem IEEE 7-Generator 57-Bus:

1. Titik A : Letak gangguan antara bus 1 dan bus 2
2. Titik B : Letak gangguan antara bus 1 dan bus 15
3. Titik C : Letak gangguan antara bus 2 dan bus 3

4. Titik D : Letak gangguan antara bus 3 dan bus 4
5. Titik E : Letak gangguan antara bus 3 dan bus 15
6. Titik F : Letak gangguan antara bus 4 dan bus 5
7. Titik G : Letak gangguan antara bus 6 dan bus 5
8. Titik H : Letak gangguan antara bus 6 dan bus 8
9. Titik I : Letak gangguan antara bus 7 dan bus 8
10. Titik J : Letak gangguan antara bus 8 dan bus 9
11. Titik K : Letak gangguan antara bus 9 dan bus 10
12. Titik L : Letak gangguan antara bus 9 dan bus 55
13. Titik M : Letak gangguan antara bus 11 dan bus 13
14. Titik N : Letak gangguan antara bus 12 dan bus 10
15. Titik O : Letak gangguan antara bus 12 dan bus 13
16. Titik P : Letak gangguan antara bus 14 dan bus 15



Gambar 4.3. Single Line Diagram Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

4.2. Analisis Aliran Daya melalui Metode Newton-Raphson

Tabel 4.1. Data Transmisi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus[11]

No.	Saluran	R (pu)	X (pu)	<i>Half Line Charging Susceptance (pu)</i>
1	1-4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2-7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3-9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4-5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4-6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5-7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6-9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7-8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8-9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 4.2. Data Tegangan dan Daya Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus[11]

No.	Tegangan Bus	Daya Terbangkit		Beban	
		P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1,0400	200,00	0,00	0,00	0,00
2	1,0250	163,00	0,00	0,00	0,00
3	1,0250	85,00	0,00	0,00	0,00
4	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,0000	0,00	0,00	125,00	50,00
6	1,0000	0,00	0,00	90,00	30,00
7	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,0000	0,00	0,00	100,00	35,00
9	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabel 4.3. Data Transmisi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

No.	Saluran	R (pu)	X (pu)	<i>Half Line Charging Susceptance (pu)</i>
1	1-2	0,0083	0,0280	0,0645
2	2-3	0,0298	0,0850	0,0409
3	3-4	0,0112	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
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

No.	Saluran	R (pu)	X (pu)	<i>Half Line Charging Susceptance (pu)</i>
25	12-16	0,0180	0,0813	0,0108
26	12-17	0,0397	0,1790	0,0238
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
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	0,1009	0,0010
49	37-39	0,0239	0,0379	0,0000

No.	Saluran	R (pu)	X (pu)	<i>Half Line Charging Susceptance (pu)</i>
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
62	50-51	0,1386	0,2200	0,0000
63	18902	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	16011	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

No.	Saluran	R (pu)	X (pu)	<i>Half Line Charging Susceptance (pu)</i>
75	56-57	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	20333	0,0000	0,1205	0,0000

Tabel 4.4. Data Tegangan dan Daya Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

No.	Tegangan Bus	Daya Terbangkit		Beban	
		P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
1	1,0400	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1,0100	0,00	0,00	3,00	88,00
3	0,9850	40,00	0,00	41,00	21,00
4	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
5	1,0000	0,00	0,00	13,00	4,00
6	0,9800	0,00	0,00	75,00	2,00
7	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
8	1,0050	450,00	0,00	150,00	22,00
9	0,9800	0,00	0,00	121,00	26,00
10	1,0000	0,00	0,00	5,00	2,00
11	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
12	1,0150	310,00	0,00	377,00	24,00
13	1,0000	0,00	0,00	18,00	2,30
14	1,0000	0,00	0,00	10,50	5,30
15	1,0000	0,00	0,00	22,00	5,00
16	1,0000	0,00	0,00	43,00	3,00
17	1,0000	0,00	0,00	42,00	8,00

No.	Tegangan Bus	Daya Terbangkit		Beban	
		P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
18	1,0000	0,00	0,00	27,20	9,80
19	1,0000	0,00	0,00	3,30	0,60
20	1,0000	0,00	0,00	2,30	1,00
21	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
22	1,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
23	1,0000	0,00	0,00	6,30	2,10
24	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
25	10,0000	0,00	0,00	6,30	3,20
26	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
27	10,0000	0,00	0,00	9,30	0,50
28	10,0000	0,00	0,00	4,60	2,30
29	10,0000	0,00	0,00	17,00	2,60
30	10,0000	0,00	0,00	3,60	1,80
31	10,0000	0,00	0,00	5,80	2,90
32	10,0000	0,00	0,00	1,60	0,80
33	10,0000	0,00	0,00	3,80	1,90
34	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
35	10,0000	0,00	0,00	6,00	3,00
36	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
37	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
38	10,0000	0,00	0,00	14,00	7,00
39	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
40	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
41	10,0000	0,00	0,00	6,30	3,00
42	10,0000	0,00	0,00	7,10	4,40

No.	Tegangan Bus	Daya Terbangkit		Beban	
		P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(Mvar)
43	10,0000	0,00	0,00	2,00	1,00
44	10,0000	0,00	0,00	12,00	1,80
45	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
46	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
47	10,0000	0,00	0,00	29,70	11,60
48	10,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
49	10,0000	0,00	0,00	18,00	8,50
50	10,0000	0,00	0,00	21,00	10,50
51	10,0000	0,00	0,00	18,00	5,30
52	10,0000	0,00	0,00	4,90	2,20
53	10,0000	0,00	0,00	20,00	10,00
54	10,0000	0,00	0,00	4,10	1,40
55	10,0000	0,00	0,00	6,80	3,40
56	10,0000	0,00	0,00	7,60	2,20
57	10,0000	0,00	0,00	6,70	2,00

Tabel 4.5. Hasil Aliran Daya Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

Bus	Pe (pu)	V (pu)	S = Pe + jQ (pu)	Ea (pu)
1	0,7164	1,0400	0.7164 + 0.2705i	1,0566
2	1,6300	1,0250	1.6300 + 0.0665i	1,0502
3	0,8500	1,0250	0.8500 - 0.1086i	1,0170
4	0,0000	1,0000	-0.0000 + 0.0000i	0,0000
5	-1,2500	1,0000	-1.2500 - 0.5000i	0,0000
6	-0,9000	1,0000	-0.9000 - 0.3000i	0,0000

Bus	P_e (pu)	V (pu)	S = P_e + jQ (pu)	E_a (pu)
7	0,0000	1,0000	0.0000 - 0.0000i	0,0000
8	-1,0000	1,0000	-1.0000 - 0.3500i	0,0000
9	0,0000	1,0000	-0.0000 + 0.0000i	0,0000

Tabel 4.5 menunjukkan kondisi aliran daya pada sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus saat beroperasi normal yang ditandai dengan kesamaan antara nominal daya mekanis P_m dengan daya elektris P_e . Daya mekanis P_m berasal dari rotor yang diputar oleh *prime mover*. Sementara, daya elektris P_e merupakan daya yang dibangkitkan pada stator generator P_e .

Penelitian ini tidak melibatkan *controller* sehingga P_m yang dihasilkan bernilai konstan dengan generator satu 0,7164 pu, generator dua 1,6300 pu, dan generator tiga 0,8500 pu. Perhitungan P_e dan daya reaktif Q berdasarkan persamaan (3.10) dan persamaan (3.11) masih melibatkan admintansi pada bus yang belum direduksi yaitu sejumlah 9-bus. Apabila sistem telah tereduksi maka perhitungan hanya melibatkan admintansi pada 3-bus. Tanda negatif pada hasil perhitungan P_e dan $S = P_e + jQ$ menandakan bus tersebut akan menerima aliran daya dari bus generator (bus 1,2, dan 3). Persamaan (3.34) menunjukkan hubungan antara tegangan internal E_A dan tegangan fasa V_ϕ . Lalu, nominal tegangan terminal V_T tergantung pada hubungan antar fasa apabila terhubung wye (*Y-connected*) maka $V_T = V_\phi$. Namun, saat terhubung delta (*Δ-connected*) $V_T = \sqrt{3}V_\phi$. Tegangan bus generator berturut-turut 1,0400 pu, 1,0250 pu, dan 1,0250 pu. Kemudian, tegangan bus lainnya bernilai 1 pu. Hasil aliran daya pada sistem IEEE 7-generator 57-bus terdapat pada lampiran.

4.3. Reduksi Jaringan pada Sistem

Reduksi Kron merupakan serangkaian perhitungan impedansi yang dilakukan setelah sistem mengalami gangguan. Impedansi tersebut meliputi impedansi sebelum terjadi gangguan (Y_{pre}), impedansi saat terjadi gangguan (Y_{fault}), dan impedansi setelah terjadi gangguan (Y_{post}). Reduksi jaringan akan menghasilkan sistem yang memiliki jumlah bus sama dengan total generatornya. Hasil reduksi jaringan sistem 7-generator 57-bus terlampir.

Tabel 4.6. Admitansi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Sebelum Terjadi Gangguan

Y <i>pre-fault</i> (pu)			
Bus	1	2	3
1	3,1056	1,5399	1,2434
2	1,5399	2,7561	1,1086
3	1,2434	1,1086	2,3843

Tabel 4.7. Admitansi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Saat Terjadi Gangguan

Y <i>on-fault</i> (pu)			
Bus	1	2	3
1	16.4474	0,0000	0,0000
2	0,0000	2,9143	0,9675
3	0,0000	0,9675	2,4906

Tabel 4.8. Admitansi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Setelah Terjadi Gangguan

Bus	Ypost-fault (pu)		
	1	2	3
1	2,6473	1,3127	1,0599
2	1,3127	2,6587	1,2008
3	1,0599	1,2008	2,3178

4.4. Pemodelan *Pre-fault* dan *On-Fault* Sistem dengan Metode Runge-Kutta 4th

Pemodelan generator Xd' pada sistem multimesin menggunakan COI. Oleh karena itu, sudut pada tegangan internal generator δ_i harus ditransformasikan kedalam COI sebagai referensi yang dinamis dalam merespons gangguan. COI merupakan nilai rata-rata berat inersia dari semua sudut rotor dan disimbolkan sebagai δ_0 . Sementara, θ_{COI} didefinisikan sebagai sudut terbaru hasil dari transformasi berdasarkan persamaan (3.32).

Pada pembahasan metode Runge-Kutta 4th, x merupakan nilai awal dari fungsi energi $f(x)$ saat terjadi gangguan. Dimana, nilai awal tersebut ialah θ_{COI} dengan kecepatan sudut rotor ω_i yang bernilai nol sebab pada kondisi ini generator masih beroperasi pada kecepatan yang sinkron. Setiap generator pada sistem 3-generator 9-bus memiliki nilai θ_{COI} sebesar -0,0764 rad, 0,2283 rad, dan 0,1137 rad. Sementara, θ_{COI} tiap generator sistem 7-generator 57-bus terdapat pada tabel 4.10.

Metode Runge-Kutta merupakan metode integrasi numerik untuk mendeterminasikan lintasan *pre-fault*, lintasan gangguan, dan titik-titik pada lintasan kritis melalui penyelesaian persamaan $f(\dot{\omega}, \dot{\delta})$. Sedangkan metode Trapezoidal merupakan metode integrasi untuk menghubungkan antar titik hingga membentuk lintasan kritis.

Tabel 4.9. θ_{COI} pada Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

Generator	θ_{COI} (rad)
1	0,3986
2	-0,3909
3	-0,4686
4	-0,6483
5	0,0106
6	-0,7541
7	-0,6402

Lalu, integrasi numerik terus dilakukan pada lintasan ganggu hingga mencapai *exit point* yang ditunjukkan sebagai nilai $\omega_{exit(n)}$ dan $\theta_{exit(n)}$.

Tabel 4.10. Exit Point pada Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

Fault Point	ω_{exit} (rad/s)			θ_{exit} (rad)		
	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3
A	-2,2366	5,7227	5,3686	-0,4865	1,1994	1,2645
B	-2,1718	7,9025	0,2290	-0,3382	1,1335	0,2420
C	-1,7703	1,2014	11,3097	-0,3223	0,4595	1,5760
D	-2,3679	5,8924	6,0374	-0,4874	1,1945	1,2820
E	-2,3631	5,8785	6,0288	-0,4857	1,1903	1,2777
F	-2,4513	8,0760	2,0458	-0,3890	1,2082	0,4854
G	-2,4928	8,2464	2,0157	-0,4050	1,2480	0,5012
H	-2,1169	2,5332	11,2439	-0,3764	0,6361	1,5974
I	-2,1287	2,5406	11,2925	-0,3800	0,6451	1,6055

4.5. Penentuan *Critical Generator*

Setelah terjadi gangguan, sistem *single machine* yang terhubung dengan *infinite bus* memiliki lintasan kritis yang menyatu dengan UEP namun tidak pada sistem multimesin. Oleh karena itu, metode BCU-Shadowing digunakan untuk mencari CUEP x^u dari banyaknya UEP. CUEP merupakan lokasi pemeriksaan indeks energi tiap generator pada titik gangguan tertentu. Batas kestabilan transien ialah 3,14 rad. Apabila terdapat generator yang memiliki CUEP mendekati nilai itu maka generator tersebut berpotensi besar untuk kehilang sinkronisme terhadap generator interkoneksi yang lain. Berdasarkan tabel 4.12, generator dua memiliki nilai CUEP yang lebih besar di setiap gangguan jika dibandingkan dengan generator lain. Sementara pada tabel 4.13, generator lima memiliki nilai CUEP yang mendekati 3,14 rad di delapan titik gangguan dari total sebelas gangguan.

Tabel 4.11. CUEP Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

<i>Fault Point</i>	CUEP (rad)		
	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3
A	-0,7846	2,0494	1,7943
B	-0,6647	2,2587	0,4098
C	-0,5569	0,7627	2,7439
D	-0,7916	2,1094	1,7217
E	-0,7854	2,0717	1,7534
F	-0,7744	2,0623	1,6868
G	-0,7871	2,2032	1,4874
H	-0,7700	2,0136	1,7562
I	-0,7899	2,1934	1,5300

Tabel 4.12. CUEP Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

<i>Fault Point</i>	CUEP (rad)						
	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Gen. 4	Gen. 5	Gen. 6	Gen. 7
A	1,026	-1,098	-1,225	-1,447	-0,645	-1,562	-1,411
B	1,022	-1,023	-1,231	-1,461	-0,666	-1,580	-1,425
C	1,025	-1,019	-1,252	-1,467	-0,665	-1,578	-1,424
D	0,295	-0,523	-0,595	-0,790	1,763	-0,966	-0,787
E	0,296	-0,527	-0,597	-0,779	1,766	-0,973	-0,794
F	0,296	-0,526	-0,600	-0,785	1,765	-0,968	-0,790
G	0,296	-0,527	-0,601	-0,782	1,766	-0,969	-0,791
H	0,300	-0,527	-0,606	-0,806	1,754	-0,959	-0,787
I	0,300	-0,529	-0,606	-0,801	1,755	-0,965	-0,791
J	0,305	-0,534	-0,601	-0,733	1,739	-1,025	-0,825
K	0,297	-0,528	-0,601	-0,780	1,764	-0,968	-0,795
L	0,297	-0,528	-0,602	-0,783	1,765	-0,972	-0,793
M	0,296	-0,526	-0,600	-0,779	1,765	-0,970	-0,789
N	0,295	-0,526	-0,599	-0,779	1,767	-0,968	-0,788
O	0,296	-0,526	-0,598	-0,779	1,766	-0,969	-0,795
P	0,296	-0,525	-0,597	-0,779	1,765	-0,973	-0,794

Pemilihan *Critical Generator* (CG) merupakan subjek utama dalam optimasi peletakan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES). Sebab, SCES akan diletakkan pada bus CG. Oleh karena itu, metode BCU *Shadowing* akan menentukan CG berdasarkan indeks energi di setiap generator pada gangguan tertentu. Berdasarkan pada persamaan (3.70), generator yang memiliki indeks energi terbesar akan berpotensi menjadi CG. Sebab, indeks energi yang besar pada internal generator akan berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan rotor generator. Sehingga, hal tersebut akan memperbesar sudut rotor dan memperpendek waktu pemutusan gangguan (CCT).

Tabel 4.13. Indeks Energi Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

Fault Point	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Nilai Maks.	CG	CG Sistem
A	0,0137	1,2898	0,5711	1,2898	2	2
B	0,1021	1,6023	0,1066	1,6023	2	
C	0,1328	0,6629	1,7572	1,7572	3	
D	0,0715	1,4907	0,6366	1,4907	2	
E	0,0844	1,5022	0,6186	1,5022	2	
F	0,1269	1,1790	0,4908	1,1790	2	
G	0,1205	1,7431	0,5436	1,7431	2	
H	0,1234	1,2382	0,5482	1,2382	2	
I	0,1264	1,7328	0,6330	1,7328	2	

Tabel 4.14 menunjukkan kondisi indeks energi pada generator interkoneksi. Saat gangguan A, generator satu memiliki indeks energi sebesar 0,0137 pu, generator dua 1,2898 pu, dan generator tiga 0,5711 pu lalu dari hasil tersebut dipilih generator yang memiliki indeks energi terbesar yaitu generator dua. Setelah CG tiap titik gangguan telah didapatkan kemudian dipilih CG sistem dari nilai CG yang paling sering muncul di tiap gangguan. Maka, CG sistem 3-generator 9-bus ialah generotor dua.

Tabel 4.14. Indeks Energi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

Fault Point	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Gen. 4	Gen. 5
A	1,4147	0,0693	0,0816	0,4961	1,0234
B	1,3967	0,0589	0,0827	0,4959	1,0322
C	1,4025	0,0609	0,0886	0,4952	1,0288
D	0,2177	0,0111	0,0131	0,0747	2,4893
E	0,2104	0,0113	0,0139	0,0745	2,4857
F	0,2135	0,0113	0,0132	0,0753	2,4904
G	0,2120	0,0114	0,0133	0,0755	2,4914
H	0,1994	0,0110	0,0130	0,0825	2,3834

<i>Fault Point</i>	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Gen. 4	Gen. 5
I	0,1969	0,0111	0,0131	0,0813	2,4011
J	0,1702	0,0105	0,0119	0,0551	2,1366
K	0,2089	0,0114	0,0131	0,0744	2,4717
L	0,2151	0,0114	0,0131	0,0748	2,5041
M	0,2134	0,0113	0,0130	0,0735	2,4859
N	0,2142	0,0113	0,0129	0,0737	2,4864
O	0,2104	0,0113	0,0130	0,0741	2,4697
P	0,2139	0,0113	0,0130	0,0737	2,4918

Tabel 4.15. Indeks Energi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus (Lanjutan)

<i>Fault Point</i>	Gen. 6	Gen. 7	Nilai Maks.	CG	CG Sistem
A	0,6938	0,5345	1,4147	1	5
B	0,6923	0,5309	1,3967	1	
C	0,6907	0,5295	1,4025	1	
D	0,1621	0,0908	2,4893	5	
E	0,1687	0,0952	2,4857	5	
F	0,1658	0,0931	2,4904	5	
G	0,1673	0,0941	2,4914	5	
H	0,1591	0,0898	2,3834	5	
I	0,1635	0,0924	2,4011	5	
J	0,1758	0,0971	2,1366	5	
K	0,1677	0,0965	2,4717	5	
L	0,1674	0,0941	2,5041	5	
M	0,1674	0,0933	2,4859	5	
N	0,1663	0,0938	2,4864	5	
O	0,1669	0,0967	2,4697	5	
P	0,1682	0,0942	2,4918	5	

Tabel 4.15 dan tabel 4.16 menunjukkan kondisi indeks energi pada generator di sistem 7-generator 57-bus. Saat gangguan A, generator interkoneksi memiliki indeks energi berturut-turut sebesar 1,4147 pu, 0,0693 pu, 0,0816 pu, 0,4961 pu, 1,0234 pu, 0,6938 pu, dan 0,5345 pu lalu dari hasil tersebut dipilih generator yang memiliki indeks energi terbesar yaitu generator satu. Namun, setelah CG tiap titik gangguan telah didapatkan kemudian dipilih CG sistem dari nilai CG yang paling sering muncul di tiap gangguan yaitu generator lima. Jadi, CG pada sistem 7-generator 57-bus ialah generator lima.

4.6. Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem Tanpa SCES

Perhitungan CCT pada sistem tanpa *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya[4]. Sehingga, pada penelitian ini hanya melampirkan data hasil perhitungan pada sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus dan 7-generator 57-bus untuk mempermudah dalam analisis hasil optimasi peletakan SCES.

4.6.1. Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Tanpa SCES

Tabel 4.16. Nilai CCT Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus Tanpa SCES

<i>Fault Point</i>	Saluran	<i>Metode Critical Trajectory</i>		CPU(s)	<i>Metode Numerik</i>	Error %
		CCT(s)	Iter.			
A	1-4	0,3419	17	1,5612	0,34-0,35	0
B	2-7	0,2128	13	1,4263	0,21-0,22	0
C	3-9	0,2595	13	1,5833	0,25-0,26	0
D	4-5	0,3260	14	1,3692	0,32-0,33	0
E	4-6	0,3254	13	1,4342	0,32-0,33	0
F	5-7	0,2246	50	1,9775	0,22-0,23	0
G	7-8	0,2317	50	2,0115	0,23-0,24	0

<i>Fault Point</i>	Saluran	<i>Metode Critical Trajectory</i>		CPU(s)	Metode Numerik	Error %
		CCT(s)	Iter.			
H	9-6	0,2573	33	3,4857	0,25-0,26	0
I	9-8	0,2608	23	1,4776	0,26-0,27	0

4.6.2. Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus Tanpa SCES

Tabel 4.17. Nilai CCT Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus Tanpa SCES

<i>Fault Point</i>	Saluran	<i>Metode Critical Trajectory</i>		CPU (s)	Metode Numerik	Error (%)
		CCT (s)	Iter.			
A	1-2	0,1336	34	1,0432	0,13-0,14	0,0
B	1-15	0,1309	50	1,2850	0,13-0,14	0,0
C	2-3	0,1787	8	0,4113	0,17-0,18	0,0
D	3-4	0,2479	24	0,7435	0,23-0,24	3,3
E	3-15	0,2457	50	1,2873	0,23-0,24	2,4
F	4-5	0,3079	11	0,4755	0,30-0,31	0,0
G	6-5	0,1894	22	0,6556	0,18-0,19	0,0
H	6-8	0,1882	20	0,7485	0,18-0,19	0,0
I	7-8	0,1908	18	0,6532	0,19-0,20	0,0
J	8-9	0,0993	27	0,9232	0,09-0,10	0,0
K	9-10	0,1333	29	0,7944	0,13-0,14	0,0
L	9-55	0,1338	20	0,6122	0,13-0,14	0,0
M	11-13	0,3011	17	0,6937	0,30-0,31	0,0
N	12-10	0,2315	30	0,9589	0,23-0,24	0,0
O	12-13	0,2323	50	1,2209	0,23-0,24	0,0
P	14-15	0,3009	23	0,8772	0,29-0,30	0,3

4.7. Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem dengan SCES

Perhitungan CCT dilakukan pada sistem tanpa mempertimbangkan controller dan damping namun memanfaatkan peletakan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) sebagai penyerap daya mekanis berlebih dari *Critical Generator* (CG) saat terjadi gangguan. Sebelumnya, metode BCU Shadowing telah dilakukan untuk mendapatkan CG sebagai generator yang memiliki nilai indeks energi terbesar jika dibandingkan dengan generator yang lain. Pada sistem 3-generator 9-bus, CG terletak di generator dua. Sementara pada sistem 7-generator 57-bus, CG terletak di generator lima.

4.7.1. Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus dengan SCES

Tabel 4.18. Nilai CCT Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus dengan SCES

Fault Point	Saluran	Metode <i>Critical Trajectory</i>		CPU [s]	Metode Numerik CCT [s]	Error %
		CCT [s]	Iter.			
A	1-4	0,3667	18	1,4044	0,36-0,37	0,0
B	2-7	0,2289	15	1,4174	0,22-0,23	0,0
C	3-9	0,2578	42	1,8990	0,25-0,26	0,0
D	4-5	0,3471	15	2,0510	0,34-0,35	0,0
E	4-6	0,3464	9	1,2260	0,34-0,35	0,0
F	5-7	0,2424	50	0,8012	0,24-0,25	0,0
G	7-8	0,2476	37	1,7952	0,24-0,25	0,0
H	9-6	0,2623	18	1,4440	0,26-0,27	0,0
I	9-8	0,2635	16	1,4710	0,26-0,27	0,0

Simulasi metode *Critical Trajectory* (Ctrj) dilakukan dengan mengaktifkan satu titik gangguan dalam satu kali perhitungan CCT. Sebab, sistem kelistrikan memiliki probabilitas yang sangat kecil untuk

terjadinya lebih dari satu gangguan dalam waktu yang bersamaan (simultan). Gangguan yang dimaksud ialah gangguan tiga fasa.

Metode ini akan menunjuk satu nilai dari rentang *Time Domain Simulation* (TDS) yang telah dimasukkan sebelumnya. TDS didapatkan melalui *trial and error* hingga mendapatkan lintasan stabil, lintasan kritis, dan lintasan tidak stabil. Hasil pada tabel 4.19 menunjukkan bahwa CCT hampir di semua titik gangguan tidak mencapai waktu ketidakstabilan sistem. Hal tersebut dibuktikan dengan perhitungan error di setiap titik gangguan bernilai nol.

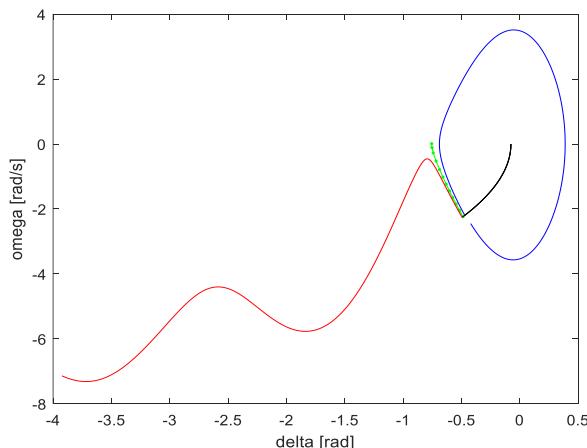
Tabel 4.19. Perbandingan Nilai CCT Sistem Anderson dan Fouad 3-Generator 9-Bus

<i>Fault Point</i>	Metode Numerik		Metode Critical Trajectory	
	Tanpa SCES	SCES	Tanpa SCES	SCES
A	0,34-0,35	0,36-0,37	0,3419	0,3667
B	0,21-0,22	0,22-0,23	0,2128	0,2289
C	0,25-0,26	0,25-0,26	0,2595	0,2578
D	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3260	0,3471
E	0,32-0,33	0,34-0,35	0,3254	0,3464
F	0,22-0,23	0,24-0,25	0,2246	0,2424
G	0,23-0,24	0,24-0,25	0,2317	0,2476
H	0,25-0,26	0,26-0,27	0,2573	0,2623
I	0,26-0,27	0,26-0,27	0,2608	0,2635

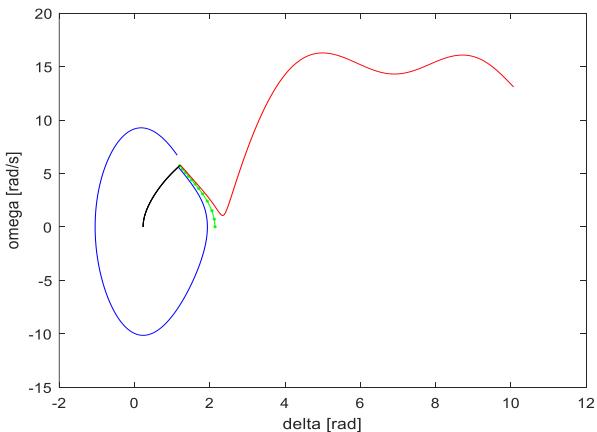
Pemasangan SCES pada bus *Critical Generator* (CG) dapat meningkatkan CCT rata-rata selama 0,0156 detik. Sehingga, SCES berhasil berperan sebagai beban tambahan yang ikut serta menyerap daya mekanis berlebih dari CG. Pembahasan berikutnya mengenai analisis grafik CCT di salah satu gangguan pada sistem 3-generator 9-bus ketika SCES diletakan pada bus CG dua serta respons yang diberikan oleh generator lainnya.

4.7.1.1. Analisis Grafik CCT pada Titik Gangguan A

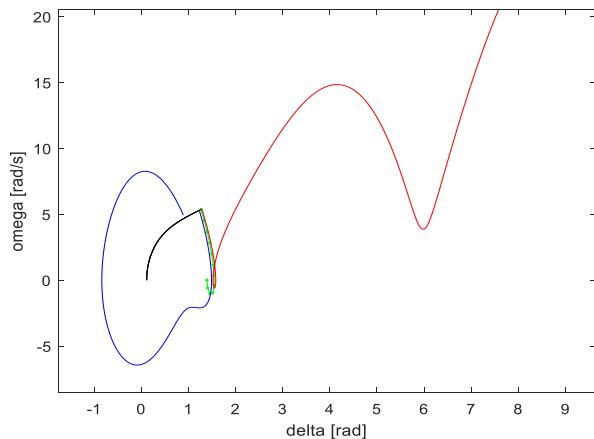
Gangguan A terjadi antara bus satu dan empat dengan TDS 0,36 detik hingga 0,37 detik. Dimana, sistem tersebut berada pada kondisi stabil sebelum memasuki waktu 0,37 detik. Kemudian, CCT yang didapatkan ialah 0,3667 detik. Maka, sistem berhasil mengisolasi gangguan sebelum generator mencapai kondisi titik akhir yaitu kondisi dimana *Critical Generator* (CG) mengalami kehilangan sinkronisme terhadap generator interkoneksi yang lain. Berdasarkan tabel 4.17, waktu tersebut lebih panjang jika dibandingkan dengan nilai CCT sebelum SCES diletakkan pada sistem yaitu 0,3419 detik dari rentang waktu 0,34 detik hingga 0,35 detik. Waktu perhitungan CCT melalui metode *Critical Trajectory* meliputi iterasi sebanyak 18 kali yang ditempuh dalam 1,4044 detik. Iterasi pada metode ini dapat dilakukan maksimal 50 kali. Di bawah ini merupakan respons generator interkoneksi terhadap optimasi peletakan SCES di bus CG.



Gambar 4.4. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-1 Sistem 3-Generator 9-Bus



Gambar 4.5. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-2 Sistem 3-Generator 9-Bus



Gambar 4.6. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-3 Sistem 3-Generator 9-Bus

4.7.2. Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus dengan SCES

Tabel 4.20. Nilai CCT Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus dengan SCES

Fault Point	Saluran	Metode <i>Critical Trajectory</i>		CPU (s)	Metode Numerik	Error %
		CCT (s)	Iterasi			
A	1-2	0,1389	22	0,7372	0,130-0,140	0,0
B	1-15	0,1245	32	0,9362	0,120-0,130	0,0
C	2-3	0,1794	7	0,4501	0,160-0,170	5,5
D	3-4	0,2489	17	0,5830	0,230-0,240	3,7
E	3-15	0,2482	50	1,3540	0,230-0,240	3,4
F	4-5	0,3242	37	1,0104	0,300-0,310	4,6
G	6-5	0,2014	12	0,4731	0,200-0,210	0,0
H	6-8	0,2003	17	0,5802	0,200-0,210	0,0
I	7-8	0,2032	34	0,9480	0,200-0,210	0,0
J	8-9	0,1040	26	0,7765	0,100-0,110	0,0
K	9-10	0,1396	21	0,6566	0,130-0,140	0,0
L	9-55	0,1401	25	0,9387	0,130-0,140	0,1
M	11-13	0,3326	21	0,6836	0,330-0,340	0,0
N	12-10	0,2403	50	1,2093	0,250-0,260	-3,9
O	12-13	0,2409	50	1,2519	0,250-0,260	-3,6
P	14-15	0,3056	50	1,0943	0,290-0,300	1,9

Selanjutnya, perhitungan CCT dilakukan pada sistem 7-generator 57-bus dengan SCES yang diletakkan pada bus *Critical Generator* (CG) yaitu generator lima. Dalam pembahasan ini, SCES seolah-olah berperan sebagai beban yang akan menerima daya mekanis berlebih dari CG.

Tabel 4.21. Perbandingan Nilai CCT Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

<i>Fault Point</i>	Metode Numerik		Metode <i>Critical Trajectory</i>	
	Tanpa SCES	SCES	Tanpa SCES	SCES
A	0,130-0,140	0,130-0,140	0,1336	0,1389
B	0,130-0,140	0,120-0,130	0,1309	0,1245
C	0,170-0,180	0,160-0,170	0,1787	0,1794
D	0,230-0,240	0,230-0,240	0,2479	0,2489
E	0,230-0,240	0,230-0,240	0,2457	0,2482
F	0,300-0,310	0,300-0,310	0,3079	0,3242
G	0,180-0,190	0,200-0,210	0,1894	0,2014
H	0,180-0,190	0,200-0,210	0,1882	0,2003
I	0,190-0,200	0,200-0,210	0,1908	0,2032
J	0,090-0,100	0,100-0,110	0,0993	0,1040
K	0,130-0,140	0,130-0,140	0,1333	0,1396
L	0,130-0,140	0,130-0,140	0,1338	0,1401
M	0,300-0,310	0,330-0,340	0,3011	0,3326
N	0,230-0,240	0,250-0,260	0,2315	0,2403
O	0,230-0,240	0,250-0,260	0,2323	0,2409
P	0,290-0,300	0,290-0,300	0,3009	0,3056

Berdasarkan tabel 4.21 optimasi peletakan SCES di bus *Critical Generator* (CG) dapat meningkatkan CCT rata-rata selama 0,0089 detik. Semakin besar sistem akan meningkatkan kerumitan dalam menyelesaikan perhitungan CCT seperti determinasi *initial point* dan UEP. Sebab, sistem multimesin memiliki lintasan kritis yang tidak konvergen dengan UEP sehingga kasus ini berbeda dengan sistem *single machine* yang terhubung dengan *infinite bus*. Pemilihan nilai UEP yang tidak tepat mengakibatkan error pada hasil akhir perhitungan CCT.

$$Error (+) = \frac{CCT(s) - Stabil(s)}{Stabil(s)} \times 100\%$$

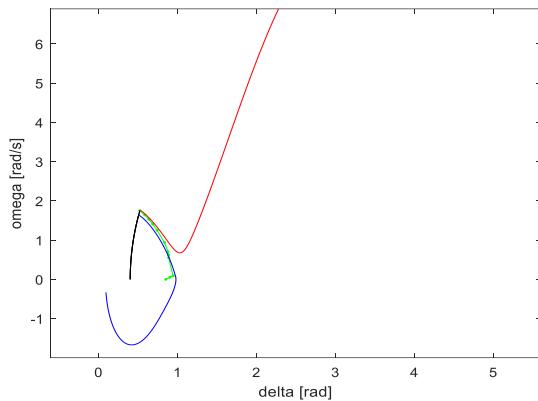
$$Error (-) = \frac{CCT(s) - Tidak Stabil(s)}{Tidak Stabil(s)} \times 100\%$$

Metode *Critical Trajectory* memiliki waktu simulasi yang lebih singkat jika dibandingkan dengan metode numerik. Metode numerik membutuhkan waktu 10 kali lebih lama dimana setiap percobaan membutuhkan waktu selama 20 detik.

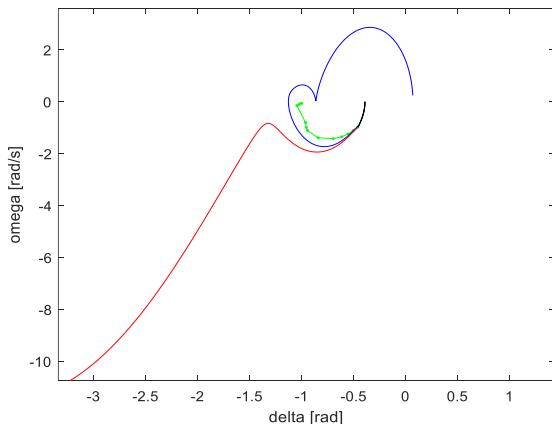
$$CPU(s)_{TDS} = 10 \times (20 + CPU(s)_{ctrj})$$

4.7.2.1. Analisis Grafik CCT pada Titik Gangguan A

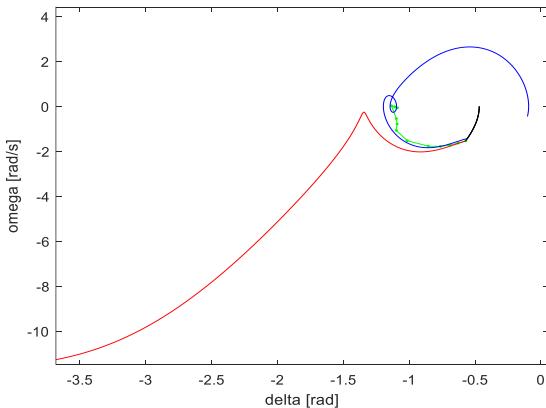
Gangguan A terjadi antara bus satu dan dua dengan TDS 0,13 detik hingga 0,14 detik. Dimana, sistem tersebut berada pada kondisi stabil sebelum memasuki waktu 0,14 detik. Kemudian, CCT yang didapatkan ialah 0,1389 detik. Maka, sistem berhasil mengisolasi gangguan sebelum generator mencapai kondisi titik akhir yaitu kondisi dimana CG mengalami kehilangan sinkronisme terhadap generator interkoneksi yang lain. Berdasarkan tabel 4.18, waktu tersebut lebih panjang jika dibandingkan dengan nilai CCT sebelum SCES diletakkan pada sistem yaitu 0,1336 detik dalam rentang waktu yang sama. Waktu simulasi ditempuh dalam 1,4044 detik dengan iterasi sebanyak 22 kali. Dimana, terasi pada metode ini dapat dilakukan maksimal 50 kali.



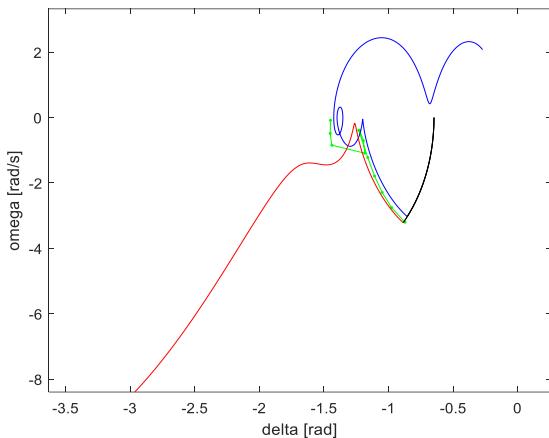
Gambar 4.7. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-1 Sistem 7-Generator 57-Bus



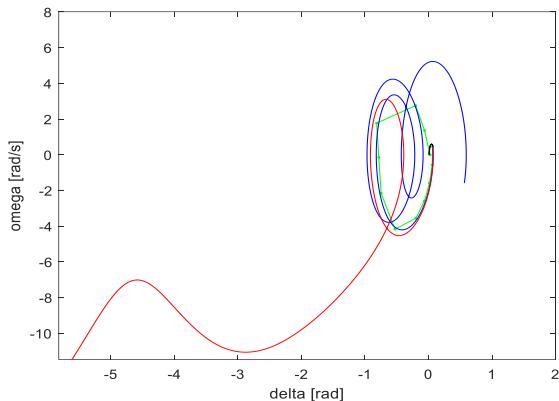
Gambar 4.8. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-2 Sistem 7-Generator 57-Bus



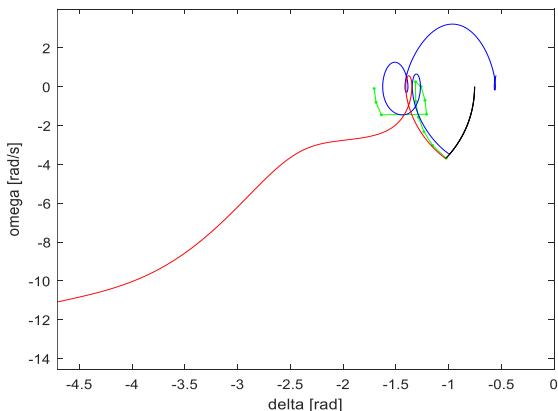
Gambar 4.9. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-3 Sistem 7-Generator 57-Bus



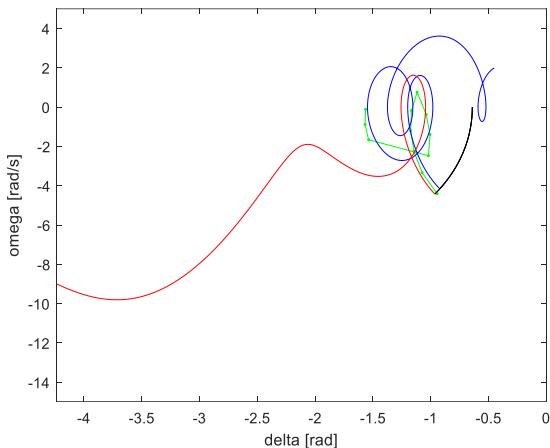
Gambar 4.10. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-4 Sistem 7-Generator 57-Bus



Gambar 4.11. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-5 Sistem 7-Generator 57-Bus



Gambar 4.12. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-6 Sistem 7-Generator 57-Bus



Gambar 4.13. Karakteristik Kecepatan sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) pada Titik Gangguan A di Generator ke-7 Sistem 7-Generator 57-Bus

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) akan diletakkan pada bus generator ke-2 di sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus. Kemudian, pada bus generator ke-5 di sistem IEEE 7-generator 57-bus.
2. Peletakan SCES pada bus *Critical Generator* (CG) akan meningkatkan *Critical Clearing Time* (CCT) rata-rata selama 0,0156 detik di sistem Anderson dan Fouad 3-generator 9-bus. Sementara, pada sistem 7-generator 57-bus, SCES akan meningkatkan CCT rata-rata selama 0,0089 detik.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian ini, penulis dapat memberikan saran untuk penelitian yang akan datang dengan topik yang sejenis sebagai berikut:

1. Optimasi peletakan *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) berbasarkan *Artificial Intelligence*.
2. Pembahasan meliputi karakteristik dari SCES seperti waktu *charging*, waktu *discharging*, *cycle life*, *spesific energy* (Wh/kg), *spesific power* (kW/kg), *cycle efficiency* (%), dan harga.
3. Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) saat SCES diletakkan pada sistem yang lebih besar.
4. Perhitungan *Critical Clearing Time* (CCT) pada sistem yang terpasang *controller*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. S. Kundur, *Power System Stability and Control.pdf*. University of Toronto, Toronto, Ontario: McGraw-Hill, Inc.
- [2] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, Fourth. New York, United States: McGraw-Hill, Inc., 2005.
- [3] T. P. Sari, A. Priyadi, and M. Pujiantara, “Improving Transient Stability Assessment by Installing Super Capacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism,” *ISITIA Conf.*, p. 5, 2015.
- [4] A. Priyadi *et al.*, “A Direct Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability using Critical Generator Conditions,” *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 22, no. 5, pp. 674–687, Jul. 2012.
- [5] H. Saadat, *Power System Analysis*. McGraw-Hill, Inc.
- [6] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui, and M. Takeshita, “A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1620–1626, Aug. 2010.
- [7] P. E. Hristov, N. Yorino, Y. Zoka, and Y. Sasaki, “Robust Method for Detection of CUEP for Power System Transient Stability Screening,” *IEEE*, 2013.
- [8] J. R. Miller, “Introduction to Electrochemical Capacitor Technology,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2010.
- [9] T. Athay, R. Podmore, and S. Virmani, “A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-98, no. 2, pp. 573–584, Mar. 1979.
- [10] N. Yorino, E. Popov, Y. Zoka, Y. Sasaki, and H. Sugihara, “An Application of Critical Trajectory Method to BCU Problem for Transient Stability Studies,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4237–4244, Nov. 2013.
- [11] P. M. Anderson and A.-A. A. Fouad, *Power system control and stability*, 2. ed. Piscataway, NJ: IEEE Press [u.a.], 2003.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Aprilia Rahmayanti, lahir di Bekasi, 21 April 1997. Penulis lulus dari SMA Negeri 1 Bekasi pada tahun 2015 dan melanjutkan pendidikan di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Fakultas Teknologi Elektro, Departemen Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Selama kuliah, Penulis terlibat dalam kegiatan kepanitian dan organisasi yaitu Koordinator Laskar Petir ITS Mengajar, Bendahara Elektro Peduli Desa (Elektroda) dimana keduanya merupakan program kerja dari Departemen Pengabdian Masyarakat, Himatektro, ITS dan anggota Steering Committee, Tim Unit Kaderisasi pada tahun kepengurusan 2016-2017. Penulis juga terdaftar sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST) pada tahun 2018-2019.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

1) Hasil Aliran Daya Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

Bus	Pe (pu)	V (pu)	S (pu)	Ea (pu)
1	4,2365	1,0400	4.2365 + 1.1177i	1,9155
2	-0,0300	1,0100	-0.0300 - 0.8875i	0,8062
3	-0,0100	0,9850	-0.0100 - 0.2196i	0,9333
4	0,0000	1,0000	-0.0000 + 0.0000i	0,0000
5	-0,1300	1,0000	-0.1300 - 0.0400i	0,0000
6	-0,7500	0,9800	-0.7500 - 0.0112i	0,9870
7	0,0000	1,0000	-0.0000 - 0.0000i	0,0000
8	3,0000	1,0050	3.0000 + 0.4007i	1,1933
9	-1,2100	0,9800	-1.2100 - 0.2386i	0,9619
10	-0,0500	1,0000	-0.0500 - 0.0200i	0,0000
11	0,0000	1,0000	-0.0000 - 0.0000i	0,0000
12	-0,6700	1,0150	-0.6700 + 1.0445i	1,1996
13	-0,1800	1,0000	-0.1800 - 0.0230i	0,0000
14	-0,1050	1,0000	-0.1050 - 0.0530i	0,0000
15	-0,2200	1,0000	-0.2200 - 0.0500i	0,0000
16	-0,4300	1,0000	-0.4300 - 0.0300i	0,0000
17	-0,4200	1,0000	-0.4200 - 0.0800i	0,0000
18	-0,2720	1,0000	-0.2720 - 0.0980i	0,0000
19	-0,0330	1,0000	-0.0330 - 0.0060i	0,0000
20	-0,0230	1,0000	-0.0230 - 0.0100i	0,0000
21	0,0000	1,0000	0.0000 + 0.0000i	0,0000
22	0,0000	1,0000	-0.0000 - 0.0000i	0,0000
23	-0,0630	1,0000	-0.0630 - 0.0210i	0,0000
24	0,0000	1,0000	0.0000 + 0.0000i	0,0000
25	-0,0630	1,0000	-0.0630 - 0.0320i	0,0000

Bus	Pe (pu)	V (pu)	S (pu)	Ea (pu)
26	0,0000	1,0000	-0.0000 - 0.0000i	0,0000
27	-0,0930	1,0000	-0.0930 - 0.0050i	0,0000
28	-0,0460	1,0000	-0.0460 - 0.0230i	0,0000
29	-0,1700	1,0000	-0.1700 - 0.0260i	0,0000
30	-0,0360	1,0000	-0.0360 - 0.0180i	0,0000
31	-0,0580	1,0000	-0.0580 - 0.0290i	0,0000
32	-0,0160	1,0000	-0.0160 - 0.0080i	0,0000
33	-0,0380	1,0000	-0.0380 - 0.0190i	0,0000
34	0,0000	1,0000	-0.0000 + 0.0000i	0,0000
35	-0,0600	1,0000	-0.0600 - 0.0300i	0,0000
36	0,0000	1,0000	-0.0000 - 0.0000i	0,0000
37	0,0000	1,0000	0.0000 - 0.0000i	0,0000
38	-0,1400	1,0000	-0.1400 - 0.0700i	0,0000
39	0,0000	1,0000	-0.0000 - 0.0000i	0,0000
40	0,0000	1,0000	0.0000 + 0.0000i	0,0000
41	-0,0630	1,0000	-0.0630 - 0.0300i	0,0000
42	-0,0710	1,0000	-0.0710 - 0.0440i	0,0000
43	-0,0200	1,0000	-0.0200 - 0.0100i	0,0000
44	-0,1200	1,0000	-0.1200 - 0.0180i	0,0000
45	0,0000	1,0000	-0.0000 - 0.0000i	0,0000
46	0,0000	1,0000	-0.0000 + 0.0000i	0,0000
47	-0,2970	1,0000	-0.2970 - 0.1160i	0,0000
48	0,0000	1,0000	0.0000 + 0.0000i	0,0000
49	-0,1800	1,0000	-0.1800 - 0.0850i	0,0000
50	-0,2100	1,0000	-0.2100 - 0.1050i	0,0000
51	-0,1800	1,0000	-0.1800 - 0.0530i	0,0000
52	-0,0490	1,0000	-0.0490 - 0.0220i	0,0000
53	-0,2000	1,0000	-0.2000 - 0.1000i	0,0000
54	-0,0410	1,0000	-0.0410 - 0.0140i	0,0000
55	-0,0680	1,0000	-0.0680 - 0.0340i	0,0000

Bus	Pe (pu)	V (pu)	S (pu)	Ea (pu)
56	-0,0760	1,0000	-0,0760 - 0,0220i	0,0000
57	-0,0670	1,0000	-0,0670 - 0,0200i	0,0000

2) Reduksi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus

1. Reduksi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus Sebelum Gangguan

Bus	Ypre (pu)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	2,5403	0,6336	0,4222	0,3094	0,2812	0,3399	0,4967
2	0,6336	3,2025	0,6383	0,4433	0,3760	0,4386	0,6087
3	0,4222	0,6383	3,3166	0,6385	0,4606	0,4869	0,5683
4	0,3094	0,4433	0,6385	3,7567	0,9896	0,7157	0,5489
5	0,2812	0,3760	0,4606	0,9896	3,9869	1,1014	0,6546
6	0,3399	0,4386	0,4869	0,7157	1,1014	4,1440	0,8890
7	0,4967	0,6087	0,5683	0,5489	0,6546	0,8890	3,9689

2. Reduksi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus Saat Gaangguan

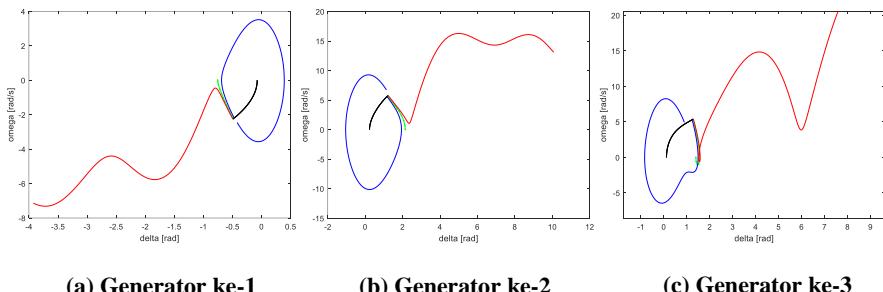
Bus	Yfault (pu)						
	1	2	3	4	5	6	7
1	3,0864	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	3,9143	0,1580	0,0911	0,0557	0,0516	0,0431
3	0,0000	0,1580	3,6338	0,4050	0,2477	0,2294	0,1915
4	0,0000	0,0911	0,4050	3,9288	0,8363	0,5285	0,2732
5	0,0000	0,0557	0,2477	0,8363	4,1290	0,9313	0,4040
6	0,0000	0,0516	0,2294	0,5285	0,9313	4,3505	0,5861
7	0,0000	0,0431	0,1915	0,2732	0,4040	0,5861	4,4020

3. Reduksi Sistem IEEE 7-Generator 57-Bus Setelah Gangguan

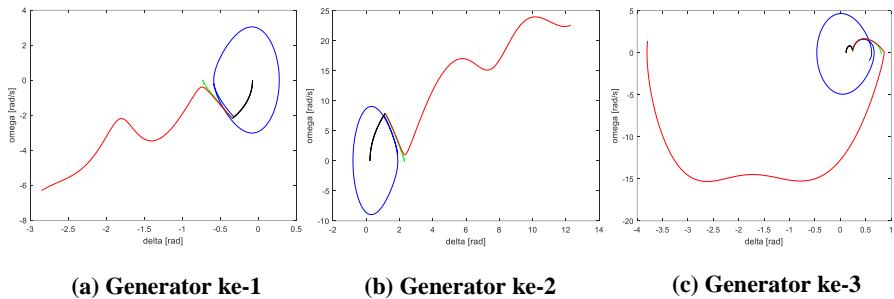
Ypost (pu)							
Bus	1	2	3	4	5	6	7
1	2,5092	0,5778	0,4111	0,0690	0,2851	0,3481	0,5162
2	0,5778	3,1107	0,6571	0,4476	0,3694	0,4245	0,5756
3	0,4111	0,6571	3,3129	0,6391	0,4591	0,4840	0,5616
4	0,3069	0,4476	0,6391	3,7567	0,9892	0,7150	0,5474
5	0,2851	0,3694	0,4591	0,9892	3,9865	1,1024	0,6569
6	0,3481	0,4245	0,4840	0,7150	1,1024	4,1422	0,8939
7	0,5162	0,5756	0,5616	0,5474	0,6569	0,8939	3,9586

3) Karakteristik Kecepatan Sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) di Sistem 3-Generator 9-Bus dengan SCES

1. Gangguan A (1-4)



2. Gangguan B (2-7)

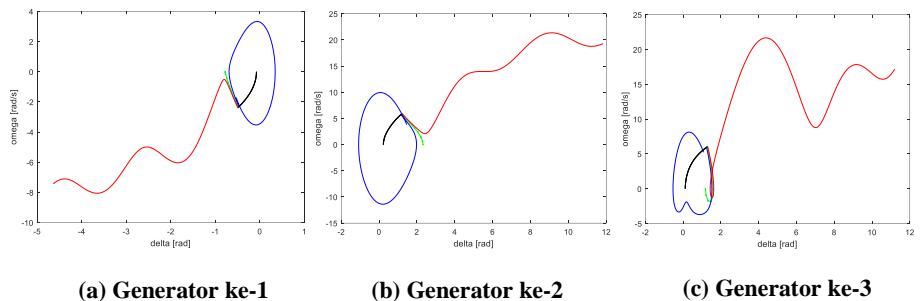


(a) Generator ke-1

(b) Generator ke-2

(c) Generator ke-3

3. Gangguan D (4-5)

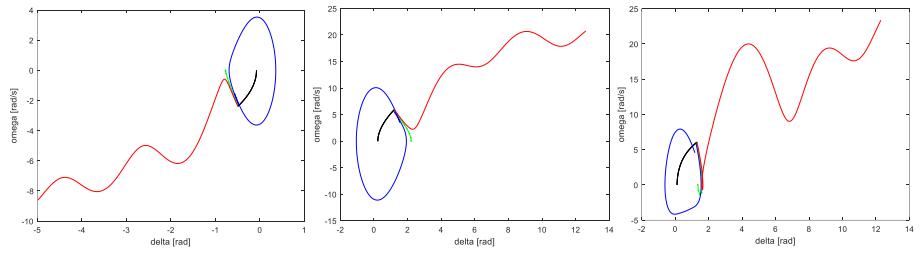


(a) Generator ke-1

(b) Generator ke-2

(c) Generator ke-3

4. Gangguan E (4-6)

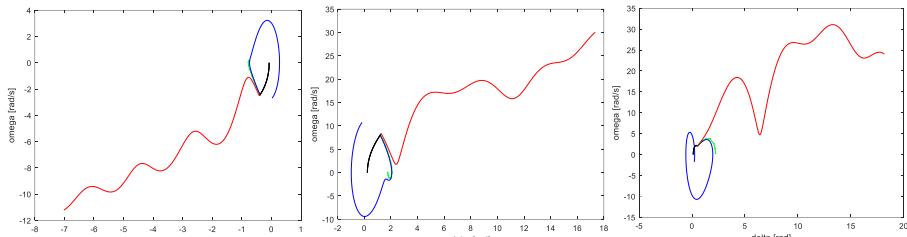


(a) Generator ke-1

(b) Generator ke-2

(c) Generator ke-3

5. Gangguan F (5-7)

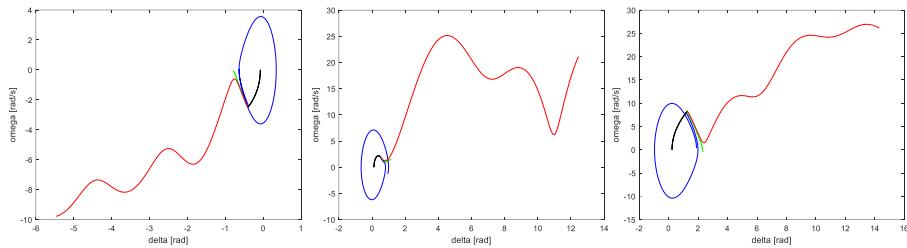


(a) Generator ke-1

(b) Generator ke-2

(c) Generator ke-3

6. Gangguan G (7-8)

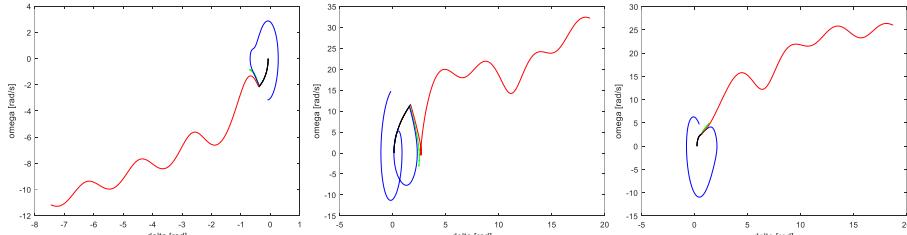


(a) Generator ke-1

(b) Generator ke-2

(c) Generator ke-3

7. Gangguan H (6-9)

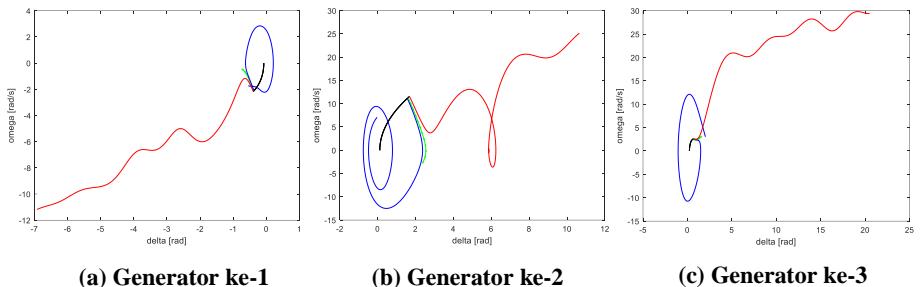


(a) Generator ke-1

(b) Generator ke-2

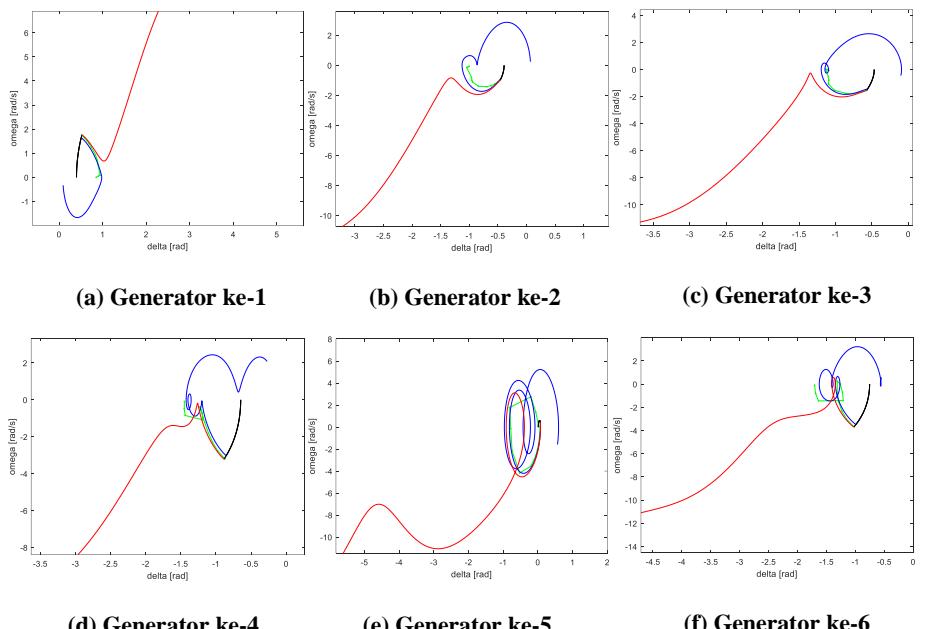
(c) Generator ke-3

8. Gangguan I

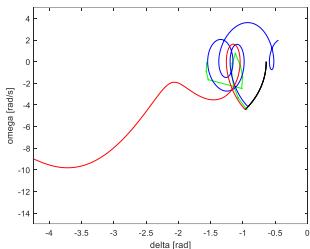


4) Karakteristik Kecepatan Sudut ω (rad/s) terhadap Sudut Rotor δ (rad) di Sistem 7-Generator 57-Bus dengan SCES

1. Gangguan A (1-2)

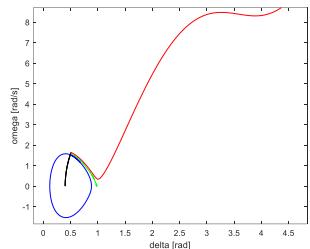


Lanjutan Gangguan A (1-2)

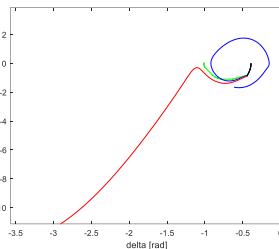


(g) Generator ke-7

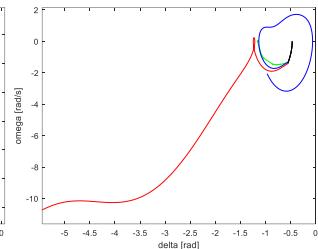
2. Gangguan B (1-15)



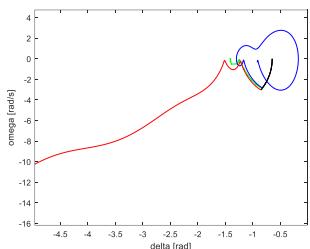
(a) Generator ke-1



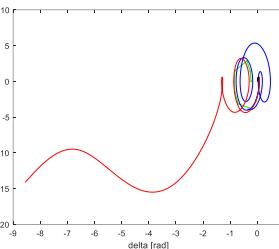
(b) Generator ke-2



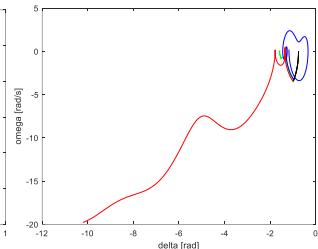
(c) Generator ke-3



(d) Generator ke-4

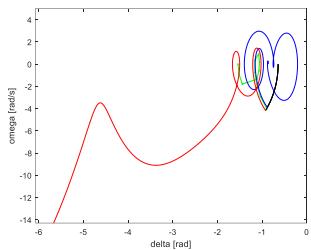


(e) Generator ke-5



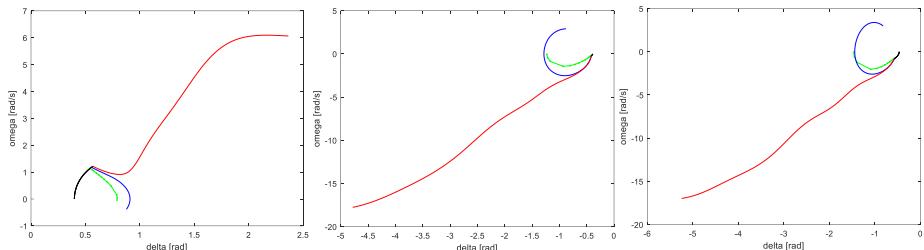
(f) Generator ke-6

Lanjutan Gangguan B (1-15)



(g) Generator ke-7

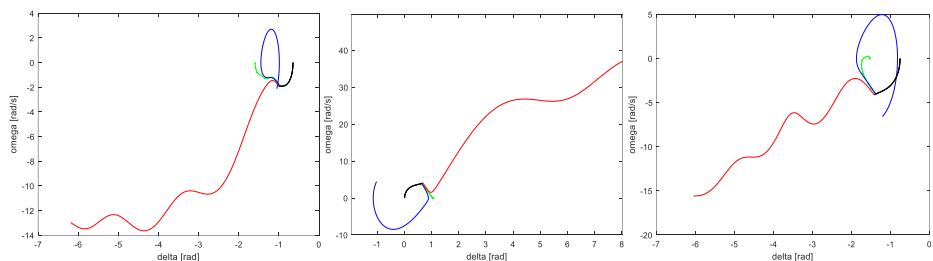
3. Gangguan N (10-12)



(a) Generator ke-1

(b) Generator ke-2

(c) Generator ke-3

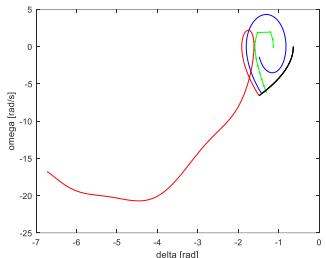


(d) Generator ke-4

(e) Generator ke-5

(f) Generator ke-6

Lanjutan Gangguan N (10-12)



(g) Generator ke-7