



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENENTUAN NILAI OPTIMAL SUPER KAPASITOR
UNTUK MEMPERBAIKI KESTABILAN TRANSIEN
BERBASIS METODE *LOSING SYNCHRONISM***

Arief Riambodo
NRP 0711154000034

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

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



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**PENENTUAN NILAI OPTIMAL SUPER KAPASITOR
UNTUK MEMPERBAIKI KESTABILAN TRANSIEN
BERBASIS METODE *LOSING SYNCHRONISM***

Arief Riambodo
NRP 07111540000034

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

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



FINAL PROJECT - EE 184801

**OPTIMAL SIZING OF SUPER CAPACITOR FOR
IMPROVING TRANSIENT STABILITY BASED ON LOSING
SYNCHRONISM METHOD**

Arief Rimbodo
NRP 07111540000034

Supervisors
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

ELECTRICAL DEPARTEMENT
Faculty of Electrical Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**PENENTUAN NILAI OPTIMAL SUPER KAPASITOR UNTUK MEMPERBAIKI KESTABILAN TRANSIEN BERBASIS METODE *LOSING SYNCHRONISM***” adalah benar benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, Juli 2019



Arief Riambo
0711154000034

Halaman ini sengaja dikosongkan

**PENENTUAN NILAI OPTIMAL SUPER KAPASITOR
UNTUK MEMPERBAIKI KESTABILAN TRANSIEN
BEBASIS METODE *LOSING SYNCHRONISM***

TUGAS AKHIR

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.
NIP. 195512071980031004



Halaman ini sengaja dikosongkan

PENENTUAN NILAI OPTIMAL SUPER KAPASITOR UNTUK MEMPERBAIKI KESTABILAN TRANSIEN BERBASIS METODE *LOSING SYNCHRONISM*

Nama Mahasiswa : Arief Riambodo
Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibyo, M.MT.

Abstrak :

Gangguan arus hubung singkat tiga fasa merupakan salah satu gangguan transien yang harus segera diisolir untuk mencegah terjadinya kehilangan sinkronisasi pada pembangkit dan agar sistem tetap stabil. *Critical clearing time* (CCT) merupakan waktu maksimal pemutusan yang diperbolehkan untuk mengisolasi gangguan agar sistem tetap stabil. Pemasangan Sistem penyimpanan energi Super Kapasitor pada sistem adalah salah satu cara untuk meningkatkan nilai CCT pada sistem. Super Kapasitor adalah salah satu penyimpan energi yang mampu mensuplai dan menyimpan tenaga listrik dalam jumlah besar dengan cepat. Super Kapasitor dapat meningkatkan nilai CCT dengan cara meredam osilasi yang ditimbulkan oleh gangguan 3 fasa. Dengan nilai CCT yang lebih besar, maka waktu operasi dari sistem proteksi lebih panjang. Hasilnya, sistem akan tetap stabil setelah gangguan diisolasi dan hal ini dapat meningkatkan kestabilan transien dari sistem. Dengan penentuan nilai Super Kapasitor yang optimal pada sistem maka akan didapatkan nilai CCT yang lebih besar dari waktu operasi sistem proteksi yang ada. Sehingga pada penelitian ini akan dilakukan optimasi nilai Super Kapasitor untuk memperbaiki kestabilan transien sistem tenaga listrik menggunakan metode *Critical Trajectory* berbasis *Losing Synchronism*.

Kata Kunci : *Kestabilan transien, Critical clearing time, Super kapasitor, critical trajectory, Losing synchronism*

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

OPTIMAL SIZING OF SUPER CAPACITOR FOR IMPROVING TRANSIENT STABILITY BASED ON LOSING SYNCHRONISM METHOD

Student Name : Arief Riambodo
Supervisor I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Supervisor II : Dr. Ir. Soediby, M.MT.

Abstract :

Three phase fault is one of a transient phenomenon that must be isolate immediately to prevent losing synchron of generator in power plant, so that the system remain stable. Critical clearing time is maximum time allowed to isolate the system fault so that the system remain stable. Super capacitor energy storage installation to the system is one way to improve CCT value. Super capacitor is one of energy storage that be able to supply and store large amounts of electricity power quickly. Super Capacitor can improve CCT value by muffle oscillation of 3 phase fault. With higher CCT value, then time operation of protection system can be longer. The result is the system remain stable after fault removed and it can be improve transient stability in power system. Within an optimal sizing of super capacitor capacities for the system, then the value of CCT that obtained is higher than protection time operation. So that in this final project will be carried out an optimal sizing of super capacitor for improving transient stability with critical trajectory based on losing synchronism method

Keywords : *Transient stability, Critical clearing time, Super capasitor, critical trajectory, Losing synchronism*

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji serta syukur penulis ucapkan atas kehadiran Allah SWT yang telah banyak memberikan nikmat dari nikmat sehat dan nikmat ilmu sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas akhir ini, yang berjudul : **“Penentuan Nilai Optimal Super Kapasitor Untuk Memperbaiki Kestabilan Transien Berbasis Metode Losing Synchronism”**.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang berjasa terutama dalam penyusunan Tugas akhir ini, yaitu :

1. Segeanap keluarga, terutama kedua orang tua penulis, Bapak Joko Heryanto dan Ibu Wahyuningsih, serta kakak, Mbak Viny indah yang telah banyak memberikan perhatian serta dukungan baik dalam doa maupun semangatnya.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing I dan Bapak Dr. Ir. Soedibyo, M.MT., selaku pembimbing II yang telah memberi banyak ilmu dan arahan.
3. Rakaditra Astungkara, Aprilia Rahmayanti, serta Almira Atha sebagai rekan satu topik transien yang selalu menjadi pemacu semangat dan tempat berbagi ilmu pengetahuan.
4. Mbak Talitha dan Mas Raki yang senantiasa membimbing, mengarahkan, dan berbagi ilmu serta pengetahuan pada riset ini.
5. Teman-teman LIPIST yang selalu menjadi pengingat dan penyemangat penulis
6. Rekan rekan e55 sebagai sobat angkatan penulis
7. Keluarga besar EMAPAL terutama angkatan 27 yang selalu setia menjadi tempat melepas penat.

Besar harapan penulis agar penelitian ini dapat memberikan banyak manfaat. Jika terdapat kesalahan, penulis berharap adanya kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan dimasa mendatang.

Surabaya, Juni 2019

Penulis

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	i
LEMBAR PENGESAHAN	vii
Abstrak :.....	ix
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB 2 DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Kestabilan Sistem Tenaga	7
2.2 Kestabilan Transien.....	8
2.3 Persamaan Ayunan.....	9
2.4 Waktu Pemutusan Kritis (<i>Critical Clearing Time</i>)	11
2.5 Critical Trajectory	12
2.6 Super Kapasitor.....	13
BAB 3 PEMODELAN SISTEM DAN METODOLOGI PENELITIAN	15
3.1 Load Flow [7].....	16
3.2 Reduksi Matriks	19
3.3 Pemodelan	20
3.4 Runge Kutta Orde 4	21
3.5 Perumusan Masalah	22

3.5.1 Definisi awal	22
3.5.2 Modifikasi persamaan Trapezoidal [9]	23
3.5.3 Kondisi kritis saat hilangnya Sinkronisasi [9]	24
3.5.4 <i>Critical Trajectory</i> Metode <i>Losing Synchronism</i>	25
3.6 Menentukan Nilai <i>Critical Clearing Time</i>	26
3.7 Modifikasi Persamaan Sistem dengan Penambahan Penyimpan Energi Super Kapasitor	28
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS	29
4.1 Penentuan Parameter Awal Sistem 3 Generator 9 Bus dan Simulasi Aliran Daya.....	29
4.2 Perhitungan nilai <i>Critical Clearing Time</i> pada sistem 3 generator 9 bus Sebelum Penambahan Super Kapasitor	31
4.2.1 Analisis Grafik CCT Hasil Simulasi <i>Critical Trajectory</i> di tiap Titik Gangguan 3 Fasa.....	35
4.3 Perhitungan nilai <i>Critical Clearing Time</i> pada sistem 3 generator 9 bus dengan Penambahan Super Kapasitor	39
4.3.1 Analisis Grafik CCT Hasil Simulasi <i>Critical Trajectory</i> berdasarkan <i>Losing Synchronism</i> di tiap Titik Gangguan 3 Fasa ..	41
4.4 Penentuan Nilai Super Kapasitor dengan Mengacu Waktu Operasi Sistem Proteksi	46
4.4.1 Kasus Pemutusan gangguan pada T- <i>Clearing</i> 1	49
4.4.2 Kasus Pemutusan gangguan pada T- <i>Clearing</i> 2	51
BAB 5 PENUTUP	55
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	55
Daftar Pustaka.....	57
BIODATA PENULIS	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Respon sudut rotor terhadap gangguan transien [3]	9
Gambar 2.2 Arah putaran torsi mekanis dan listrik dari rotor generator	10
Gambar 2.3 Lintasan kritis generator saat kestabilan transien [5]	12
Gambar 3.1 Diagram alir Metodologi Penelitian	15
Gambar 3.2 Ilustrasi metode Newton Raphson.....	17
Gambar 3.3 Konsep persamaan metode Trapezoidal	24
Gambar 3.4 Konsep CCT	27
Gambar 4.1 Sistem 3 Generator 9 Bus	30
Gambar 4.2 Tahapan dalam Perhitungan CCT secara Langsung	33
Gambar 4.3 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 1 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik A	36
Gambar 4.4 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik A	36
Gambar 4.5 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 3 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik A	37
Gambar 4.6 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 1 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik D	38
Gambar 4.7 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 bus saat terjadi gangguan 3 fasa di titik D..	38
Gambar 4.8 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 3 bus saat terjadi gangguan 3 fasa di titik D..	39
Gambar 4.9 Tahapan perhitungan CCT dengan Penambahan Super Kapasitor	40
Gambar 4.10 Grafik nilai CCT di tiap titik gangguan saat penambahan super kapasitor	48
Gambar 4.11 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik B dengan t-clearing 1	49
Gambar 4.12 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik B dengan t-clearing 1 setelah penambahan super kapasitor 0,1 pu	50
Gambar 4.13 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik B dengan t-clearing 2	51

Gambar 4.14 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik B dengan t-clearing 2 setelah penambahan super kapasitor 0,5 pu.....52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Waktu pemutusan rele pengaman [4]	11
Tabel 4.1 Data Transmisi Sistem 3 Generator 9 Bus	30
Tabel 4.2 Data bus sistem 3 Generator 9 Bus	31
Tabel 4.3 Hasil iterasi aliran daya untuk generator	31
Tabel 4.4 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 Generator 9 Bus tanpa Super Kapasitor.....	34
Tabel 4.5 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik A	41
Tabel 4.6 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik B.....	42
Tabel 4.7 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik C.....	42
Tabel 4.8 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik D	43
Tabel 4.9 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik E.....	44
Tabel 4.10 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik F	45
Tabel 4.11 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik G	45
Tabel 4.12 Nilai CCT di setiap titik gangguan dengan penambahan Super Kapasitor	46
Tabel 4.13 Nilai CCT tiap titik gangguan setelah penambahan SC 0,1 pu	50
Tabel 4.14 Nilai CCT tiap titik gangguan setelah penambahan SC 0,5 pu	53

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Stabilitas sistem tenaga merupakan salah satu permasalahan utama dalam menjaga kontinuitas pada operasi sistem [1]. Perubahan daya dalam jumlah besar secara tiba-tiba dapat mengakibatkan stabilitas sistem tenaga terganggu. Dengan adanya gangguan pada sistem akan dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Oleh karena itu, untuk melindungi sistem tenaga listrik dari gangguan adalah dengan memasang rele pengaman yang dapat mendeteksi gangguan dan mentrigger *circuit breaker* untuk memutus saluran. Namun, setelah gangguan dihilangkan tidak menjamin sistem akan kembali dalam kondisi *steady state* dikarenakan adanya waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*). Sistem akan dapat kembali ke kondisi stabil jika *circuit breaker* memutus saluran sebelum CCT, sebaliknya jika *circuit breaker* memutus saluran setelah CCT maka sistem akan menjadi tidak stabil. Nilai CCT pada sistem dapat ditambahkan atau diperbaiki dengan pemasangan Super kapasitor.

Super Kapasitor adalah salah satu penyimpan energi yang mampu mensuplai tenaga listrik dalam jumlah besar. Pemasangan Super Kapasitor berada di bus generator guna menambah nilai CCT dengan cara meredam daya mekanis agar seimbang dengan daya elektrik yang mengalami penurunan saat terjadi gangguan hubung singkat. Dengan nilai CCT yang bertambah, maka jaminan sistem untuk kembali stabil lebih besar karena kemungkinan waktu pemutusan oleh *circuit breaker* dapat lebih kecil daripada nilai CCT sistem. Dengan penentuan nilai Super Kapasitor yang optimal pada sistem maka akan didapatkan nilai CCT yang paling besar. Untuk memperoleh nilai Super Kapasitor yang optimal, akan dilakukan simulasi pemasangan Super Kapasitor pada sistem dengan menggunakan metode *Losing synchronism*. Metode *Losing Synchronism* merupakan metode penentuan lintasan kritis (*critical trajectory*) untuk mendapatkan nilai CCT secara langsung.

Pada Penelitian ini metode *Losing Synchronism* akan dijadikan landasan untuk analisa kestabilan transien sistem multi mesin dengan penambahan Super Kapasitor pada bus generator serta dengan dilakukan optimasi nilainya diharapkan dapat meningkatkan nilai CCT dan mampu

memperbaiki kestabilan transien, sehingga kestabilan sistem tenaga menjadi lebih baik.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah menghitung nilai CCT dengan menggunakan metode *critical trajectory* berdasarkan hilangnya sinkronisasi (*losing synchronism*). Selanjutnya setelah mendapatkan nilai CCT sistem, perlu dilakukan analisa waktu operasi sistem pengaman yang sudah ada untuk melihat apakah sistem mampu mempertahankan kestabilannya akibat gangguan 3 fasa ke tanah. Permasalahan selanjutnya adalah menentukan nilai optimal dari Super Kapasitor yang ditambahkan pada sistem untuk mendapatkan waktu pemutusan kritis (*Critical Clearing Time*) yang lebih besar dari waktu asumsi operasi sistem pengaman akibat dari gangguan 3 fasa ke tanah.

1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam Penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mendapatkan nilai CCT pada sistem muti mesin menggunakan metode *critical trajectory* berdasarkan hilangnya sinkronisasi (*losing synchronism*).
2. Mendapatkan nilai optimal super kapasitor berdasarkan penambahan nilai CCT sistem yang melebihi waktu asumsi operasi sistem pengaman yang ada.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang digunakan dalam pengerjaan Penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Simulasi menggunakan *software* MATLAB R2017a
2. Data sistem yang digunakan untuk simulasi berdasarkan data dari sistem IEEE 3 generator 9 bus
3. Dalam penentuan Super Kapasitor mengabaikan karakteristik dan rating di pasaran
4. Penggunaan kontrol pada Super Kapasitor diabaikan

1.5 Metodologi

Dalam penyusunan dan pengerjaan penelitian ini, metodologi yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Studi literatur yang digunakan penulis untuk pengerjaan penelitian ini adalah berdasarkan *paper*, buku referensi, serta jurnal ilmiah yang berhubungan dengan analisis kestabilan transien dan metode langsung dan tidak langsung untuk mendapatkan nilai CCT, serta artikel mengenai studi super kapasitor dan sistem proteksi tenaga listrik.

2. Pengumpulan Data dan Parameter

Data sistem yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data standar dari sistem multimesin IEEE yaitu berupa data xd generator data saluran, data sumber dan data beban untuk menunjang simulasi dan keakuratan dari hasil penelitian ini.

3. Pemodelan Sistem

Dari data yang didapatkan maka selanjutnya dilakukan pemodelan dalam bentuk persamaan matematika dan pemodelan penambahan super kapasitor pada sistem. Dari pemodelan ini akan didapatkan alur untuk menghitung nilai *Critical Clearing Time* pada sistem multimesin dan nilai super kapasitor untuk meningkatkan kestabilan transien menggunakan metode *Critical Trajectory* berbasis *Losing synchronism*.

4. Perancangan Algoritma Program dan Simulasi

Pemodelan sistem dalam bentuk persamaan akan dirancang menjadi algoritma program MATLAB. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan nilai CCT menggunakan metode *Critical Trajectory* berbasis *Losing synchronism* yang kemudian akan dilakukan penambahan optimal Super kapasitor pada sistem dengan mengacu waktu operasi sistem proteksi.

5. Analisis dan Perbandingan

Dari hasil simulasi program, akan dibandingkan nilai CCT antara sistem sebelum ada penambahan Super kapasitor dengan setelah penambahan Super kapasitor. Setelah itu dilakukan pengoptimalan nilai super kapasitor dengan menganalisa waktu operasi sistem pengaman yang ada (*clear fault*).

6. Penulisan Buku

Buku Tugas akhir ini ditulis sebagai laporan hasil dari Penelitian. Penulisan laporan Tugas akhir dilakukan untuk menunjukkan hasil dan kesimpulan dari Penelitian.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam Penelitian ini terdiri atas lima bab, dengan uraian sebagai berikut :

1. Bab 1

Bab 1 merupakan pendahuluan Penelitian yang berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, serta relevansi dari laporan Penelitian

2. Bab 2

Bab 2 merupakan teori penunjang yang menjadi acuan Penelitian meliputi teori sistem tenaga listrik secara umum dan disertai penjelasan-penjelasan khusus mengenai kestabilan transien untuk multimesin. Pada bab ini juga akan dijelaskan mengenai *critical clearing time* (CCT) beserta kaitanya dengan kestabilan sistem tenaga. Bab ini juga akan membahas prinsip kerja super kapasitor saat keadaan transien, dan teori dasar mengenai *Critical Trajectory*.

3. Bab 3

Bab 3 menjelaskan tentang tahapan perancangan Penelitian yang akan dilakukan, yaitu mengenai data sistem yang digunakan, permodelan matematika dan algoritma simulasi, serta perancangan program simulasi program Matlab yang akan dijalankan untuk menganalisa permasalahan dalam Penelitian

4. Bab 4

Bab 4 menjelaskan tentang hasil dan simulasi meliputi perhitungan CCT melalui metode *Critical trajectory* berbasis *Lossing synchronism* dengan membandingkan metode simulasi konvensional (TDS). Serta simulasi penambahan kapasitas optimal dari super kapasitor untuk meningkatkan nilai CCT berada diatas waktu operasi sistem proteksi yang bekerja.

5. Bab 5

Bab 5 menjelaskan tentang kesimpulan yang diambil dari hasil simulasi program dan analisis yang telah dilakukan. Juga terdapat saran perbaikan agar hasil dari Penelitian ini dapat dikembangkan dan disempurnakan pada Penelitian selanjutnya.

1.7 Relevansi

Hasil yang didapatkan dari Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi di bidang sistem tenaga, khususnya pada analisis kestabilan transien sistem tenaga serta pengaruh kapasitas Super kapasitor dalam kestabilan sistem tenaga. Hasil Penelitian ini juga dapat dimanfaatkan sebagai dasar teori bagi penelitian di masa depan serta menjadi referensi bagi mahasiswa Teknik Elektro yang ingin meneliti masalah kestabilan transien system tenaga sebagai topik Penelitian maupun Tugas akhir.

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BAB 2

DASAR TEORI DAN TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kestabilan Sistem Tenaga

Kestabilan sistem tenaga adalah kemampuan sebuah sistem tenaga listrik, dengan kondisi inisial operasinya, agar dapat kembali stabil setelah mengalami gangguan, dengan batasan variabel tertentu sehingga sistem tetap beroperasi normal [1]. Keadaan stabil pada sistem tenaga listrik yaitu, daya input mekanis yang ada pada *prime mover* generator pembangkit seimbang dengan daya output (beban listrik). Dengan keadaan seimbang, semua generator yang terhubung pada sistem akan berkerja pada putaran sinkron. Hal tersebut dapat dicapai bila setiap perubahan daya output elektrik (beban listrik) diikuti dengan perubahan daya input mekanis dari *prime mover* generator [2]. Kestabilan sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh gangguan pada sistem. Untuk gangguan yang besar seperti hubung singkat 3 fasa ke tanah, sistem akan mengalami penurunan daya elektrik yang besar. Jika penurunan daya elektrik tidak dapat diimbangi oleh daya mekanis *prime mover* maka mengakibatkan percepatan putaran pada generator. Saat gangguan dihilangkan oleh *circuit breaker* daya elektrik kembali naik, jika daya mekanis tidak mampu mengimbangi akan terjadi perlambatan putaran generator. Kedua kondisi tersebut bila terjadi terus menerus maka, generator akan mengalami keadaan lepas sinkron. Berdasarkan referensi [2], terdapat tiga bahasan penting dalam kestabilan sistem tenaga, stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi, stabilitas tegangan.

a) Kestabilan sudut rotor

Kestabilan sudut rotor mengacu pada kemampuan generator yang terhubung secara paralel pada sistem. Generator harus mampu mempertahankan keseimbangan torsi mekanis dan torsi elektrik. Ketidakseimbangan torsi mekanis dan elektrik mengakibatkan lepasnya sinkronisasi pada generator tersebut.

b) Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan agar frekuensi tetap stabil setelah sistem mengalami gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan beban dengan pembangkitan

c) Kestabilan Tegangan

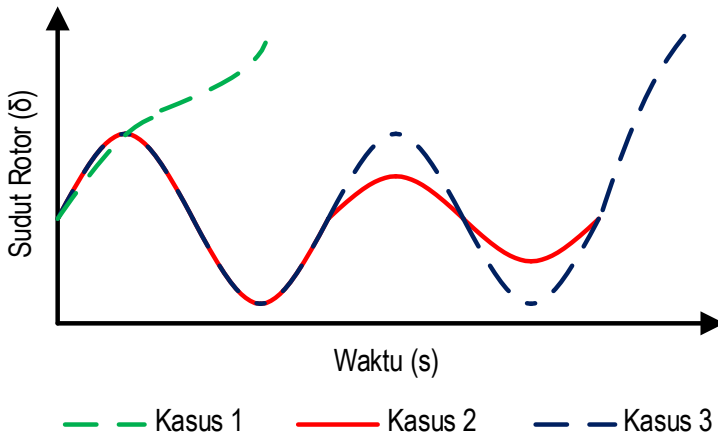
Kestabilan tegangan mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kestabilan tegangan pada setiap bus dalam sistem setelah terjadinya gangguan.

2.2 Kestabilan Transien

Perubahan daya mendadak seperti terputusnya generator atau generator *outage*, akibat gangguan hubung singkat, dan mode pengoperasian starting motor merupakan beberapa faktor penyebab kegagalan sistem untuk menjaga kestabilan transiennya. Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem untuk mempertahankan sinkronisasinya agar tidak lepas dengan sistem ketika terjadi gangguan - gangguan besar secara tiba-tiba selama sekitar satu ayunan pertama (*first swing*) ketika pengatur tegangan otomatis (AVR) dan governor belum bekerja [2]. Analisis kestabilan transien perlu dilakukan untuk menganalisa sistem terhadap gangguan besar yang terjadi, misalnya pemutusan oleh CB secara tiba-tiba maupun gangguan hubung singkat.

Kestabilan transien tergantung pada kondisi awal dan besarnya gangguan. Hal ini berkaitan pada kemampuan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada setiap mesin sinkron yang terdapat pada sistem tenaga listrik tersebut. Jika kesetimbangan terganggu, maka terjadi perbedaan antara torsi mekanik dan torsi elektromekanik sehingga mengakibatkan percepatan atau perlambatan putaran rotor generator. Percepatan yang terjadi akan menyebabkan sudut rotor generator menjadi lebih besar sedangkan perlambatan yang terjadi akan menyebabkan sudut rotor menjadi lebih kecil. Kondisi sistem akan stabil jika sudut rotor terus mengalami penurunan osilasi. Sedangkan kondisi tidak stabil terjadi apabila rotor generator terus mengalami percepatan hingga pergeseran sudut rotor terus mengalami peningkatan secara tetap dan berakhir pada generator hilang sinkronisasi.

Pada penelitian ini kestabilan transien yang dibahas adalah kestabilan sudut rotor. Perbandingan daya (P) dan sudut rotor (δ) sangat berpengaruh pada kestabilan sudut rotor. Pada saat operasi manual maka daya mekanik generator sama dengan daya elektrik dari sistem. Namun pada saat gangguan maka terjadi perbedaan antara daya mekanik generator dan daya listrik sistem.



Gambar 2.1 Respon sudut rotor terhadap gangguan transien [3]

Gambar 2.1 menunjukkan kondisi stabil dan tidak stabil pada generator sinkron. Pada kasus 1 sistem tidak stabil, sudut rotor terus meningkat sehingga generator lepas dari sinkronisasinya. Pada kasus 2 sudut rotor sempat mengalami isolasi, yang awalnya sudut sempat meningkat hingga cukup tinggi, kemudian kembali menurun untuk mempertahankan sinkronisasinya, sampai menuju *steady state*. Sedangkan pada kasus 3 saat awal kondisi sistem, tepatnya pada saat ayunan pertama sistem menunjukkan stabil, akan tetapi sistem menjadi tidak stabil, akibat dari semakin besarnya osilasi yang timbul pada saat mencapai kondisi akhir.

2.3 Persamaan Ayunan

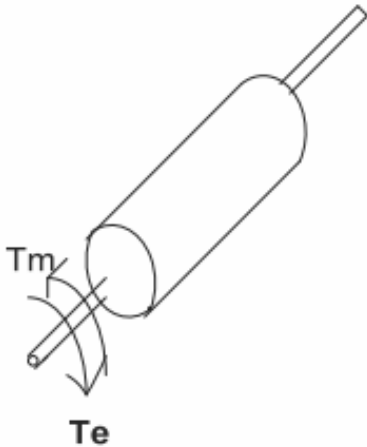
Dalam melakukan analisis kestabilan suatu sistem tenaga listrik, membuat model matematika perlu dilakukan untuk menggambarkan dinamika sistem tenaga listrik saat ada gangguan besar. Model matematika yang dipakai untuk mesin sinkron pembangkit listrik adalah persamaan ayunan. Persamaan ayunan berhubungan dengan pergerakan rotor akibat torsi inersia dari resultan torsi mekanis (T_m) dengan torsi listrik rotor (T_e).

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

Dimana

- J : Momen inersia dari massa rotor ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
 θ_m : Pergeseran sudut rotor mekanis (radian)
 t : Waktu (detik)
 T_a : Torsi percepatan (N-m)

Jika T_m dan T_e dianggap positif untuk generator sinkron berarti bahwa T_m adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah θ_m yang positif. Prinsip dasar ini diilustrasikan dengan gambar berikut



Gambar 2.2 Arah putaran torsi mekanis dan elektrik dari rotor generator

Karena θ_m diukur terhadap sumbu diam pada stator maka posisi sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dengan kecepatan sinkron maka:

$$\omega_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (2.2)$$

Sehingga kecepatan putaran rotor :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.3)$$

Dimana

- ω_m : Kecepatan sinkron generator (radian)
 δ_m : Pergeseran sudut rotor terhadap sumbu yang berputar dalam

Kecepatan sinkron

$\frac{d\delta_m}{dt}$: Penyimpangan kecepatan rotor dalam keadaan serempak (rad/detik)

Maka persamaan (2.1) dapat diubah menjadi

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

Jika dikalikan dengan ω_m maka :

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

Dengan kecepatan putar dikali torsi= daya, dan $J\omega_m$ = Momen sudut rotor dinyatakan dengan M, maka persamaan dapat ditulis :

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

Persamaan (2.6) merupakan persamaan dasar yang mengatur dinamika perputaran mesin sinkron dalam studi kestabilan, atau disebut persamaan ayunan [3].

2.4 Waktu Pemutusan Kritis (*Critical Clearing Time*)

Pemutusan saluran akibat adanya gangguan hubung singkat menyebabkan perubahan kondisi awal pada sistem tenaga listrik. Pemutusan saluran dilakukan oleh rele pengaman melalui *Circuit Breaker* (CB). Tabel 2.1 menunjukkan rincian waktu bekerja komponens sistem proteksi

Tabel 2.1 Waktu pemutusan rele pengaman [4]

Operasi pada Relay	Tipe Relay	
	Statis	Elektromekanik
Lama CB memutus saluran	0,08s	0,08s
Relay Overtravel	0	0,1s
Toleransi Error Relay	0,12s	0,12s
Total CTI	0,2s	0,3s

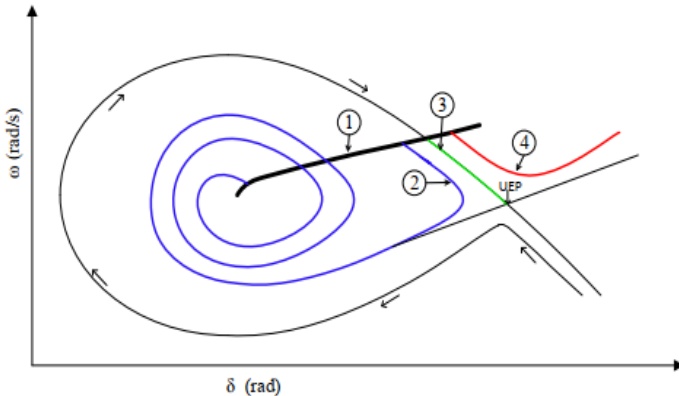
Pada saat terjadi gangguan, rele pengaman akan memberikan sinyal pada CB untuk memutus saluran dalam waktu kurang dari 0,3 detik

sehingga peralatan pada sistem akan teramankan dari kerusakan akibat hubung singkat. Namun, kondisi tersebut tidak menjamin sistem akan kembali pada kondisi stabil. Hal ini dikarenakan adanya waktu pemutusan kritis atau *critical clearing time* (CCT) pada sistem tenaga listrik.

Metode awal untuk menentukan nilai CCT adalah metode TDS (*Time Domain Simulation*). Metode ini merupakan metode tidak langsung, karena CCT didapatkan secara perkiraan. Selanjutnya metode penentuan CCT berkembang menuju metode langsung, salah satunya adalah Metode *Energy Function*. Metode ini disebut metode langsung karena nilai CCT langsung didapat. Namun tingkat keakuratan metode ini masih kurang.

2.5 Critical Trajectory

Metode *Critical trajectory* atau yang biasa disebut dengan metode lintasan kritis merupakan metode analisis yang menggunakan lintasan yang dimulai dari titik terjadinya gangguan (*fault on trajectory*) hingga mencapai titik kritis dimana sistem akan kehilangan sinkronisasinya (*loss of synchronism*) [5].



Gambar 2.3 Lintasan kritis generator saat kestabilan transien [5]

Pada Gambar 2.3 menunjukkan lintasan (trajectory) dari sebuah generator saat terjadi kestabilan transien. Lintasan “1” menunjukkan *fault on trajectory* yaitu lintasan saat terjadi gangguan yang dimulai dari *Stable Equilibrium Point* (SEP). Lintasan “2” menunjukkan kondisi sistem stabil setelah terjadinya gangguan. Lintasan “4” menunjukkan kondisi sistem tidak dapat kembali ke kondisi stabil setelah terjadinya gangguan

dikarenakan gangguan terlambat diputus. Sedangkan lintasan “3” merupakan lintasan kritis (*critical trajectory*) suatu sistem tenaga listrik. CCT dapat ditentukan dengan menghitung perbedaan waktu antara SEP dan *exit point*.

2.6 Super Kapasitor

Sistem Penyimpanan Super Kapasitor (SCES) merupakan suatu alat penyimpan energi yang memiliki kapasitansi yang besar, kepadatan energi tinggi, pengisian dan pengosongan yang sangat cepat dibanding kapasitor maupun peralatan penyimpan energi konvensional lainnya. Dalam penelitian ini Super kapasitor digunakan sebagai penyimpan energi pada sistem apabila terjadi gangguan. Super kapasitor akan meredam osilasi yang timbul saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa. Kemampuan respon super kapasitor yang lebih cepat dibandingkan dengan *speed governor* dan AVR juga menjadi salah satu alasan super kapasitor digunakan dalam penelitian ini [6]. Saat terjadi pelepasan beban sistem secara tiba-tiba, kapasitor akan dengan segera berada dalam kondisi *charging* sampai penuh, di mana sebagian energi berlebih dalam sistem akan terserap. Ketika sistem kembali pada kondisi steady state, energi berlebih yang diserap kemudian dilepaskan dan tegangan kapasitor kembali ke nilai normalnya.

SCES terdiri dari kapasitor dan resistor. Kapasitor terhubung parallel dan resistor terhubung parallel pada kapasitor. Rugi dielektrik dan rugi bocor digambarkan dengan resistor tersebut. Dalam penelitian ini, penyimpangan pada nilai arus dalam energi penyimpanan kapasitor adalah :

$$\Delta Id = \frac{K_{ces} \cdot \Delta P - KVD \cdot Ed0}{1 + STdc} \quad (2.7)$$

K_{ces} pada SCES adalah konstan ΔP adalah penyimpangan daya elektrik, KVD adalah umpan balik. Setelah itu , nilai dari ΔEd atau penyimpangan tegangan dihitung persamaan 2.8

$$\Delta Ed = \left[\frac{1}{Sc + 1/R} \right] * \Delta Id \quad (2.8)$$

Keterangan:

Sc = Kapasitor (F)

R = resistor (Ω)

ΔEd = Penyimpangan tegangan kapasitor (pu)

ΔId = Penyimpangan arus

Maka daya keluaran SCES yang dilepas ke sistem pada saat terjadi perubahan beban adalah sebagai berikut

$$\Delta P_{sces} = \Delta Id \times (\Delta Ed + Ed0) \quad (2.9)$$

Keterangan:

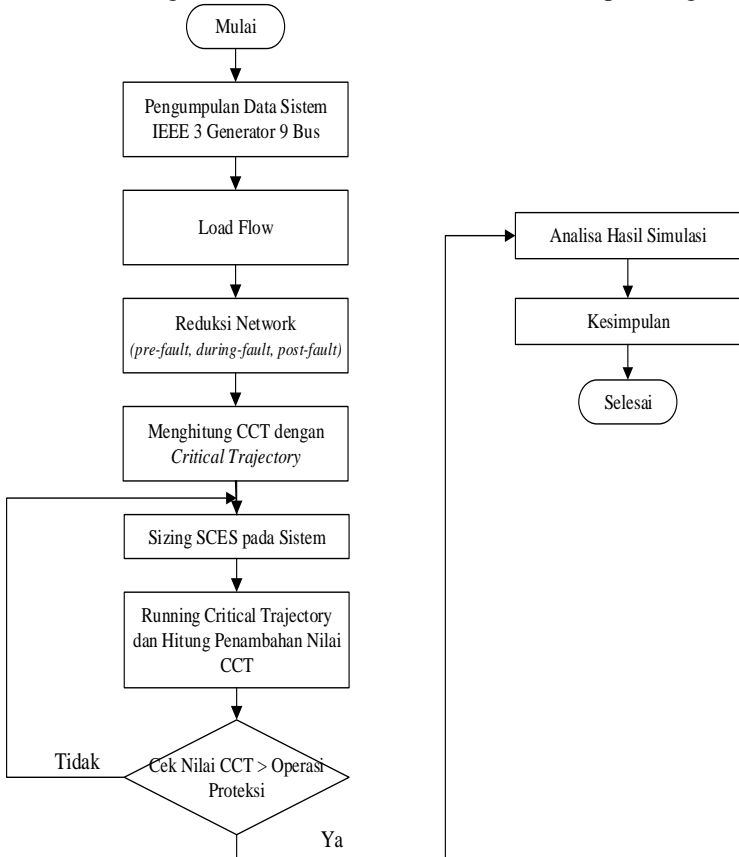
ΔP_{sces} = Keluaran daya SCES

$Ed0$ = Kontrol tegangan kapasitor

BAB 3

PEMODELAN SISTEM DAN METODOLOGI PENELITIAN

Pada Penelitian ini, nilai *Critical clearing time* merupakan parameter akhir yang digunakan untuk acuan menentukan nilai super kapasitor yang optimal. Perhitungan CCT dilakukan melalui beberapa langkah.



Gambar 3.1 Diagram alir Metodologi Penelitian

3.1 Load Flow [7]

Load flow atau studi aliran daya merupakan proses awal untuk mendapatkan parameter awal seperti, daya aktif (P), daya reaktif (Q) dari pembangkit ke beban, serta besar tegangan tiap bus dan arus tiap saluran. Dari parameter yang sudah didapatkan akan dilanjutkan dengan proses metode iterasi selanjutnya. Langkah awal untuk analisis aliran daya adalah dengan membaca admitansi antar bus yang dapat dituliskan dalam matriks dibawah ini,

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{31} & Y_{32} & \cdots & Y_{3n} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Setelah didapatkan admitansi antar bus maka selanjutnya menghitung aliran daya dengan persamaan umum berikut

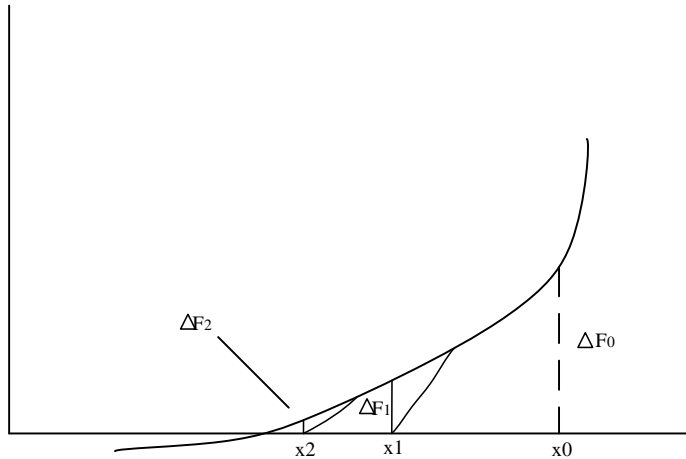
$$P_i - jQ_i = \sum_i^n \sum_j^n V_i^* V_j Y_{ij} \quad (3.2)$$

Dimana :

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

Metode newton raphson merupakan metode yang dipakai untuk perhitungan aliran daya pada penelitian ini. Newton Raphson merupakan hasil dari pengembangan dari deret Taylor yang digunakan untuk mendapatkan turunan persamaan matematik . Perhitungan iterasi Newton Raphson menggunakan Jacobian Matriks. Ilustrasi penjelasan Newton Raphson akan digambarkan pada gambar dibawah ini.

F(x)



Gambar 3.2 Ilustrasi metode Newton Raphson

Pemodelan metode Newton Raphson menggunakan pendekatan persamaan dari deret Taylor, yang didefinisikan sebagai berikut

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

Dengan menggunakan analisis daya aktif dan reaktif pada persamaan 3.2, maka persamaan sistem dapat dituliskan menjadi bentuk polar

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

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

Dengan

$$G_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij}$$

$$B_{ij} = |Y_{ij}| \sin \theta_{ij}$$

maka

$$P_i = \sum_i^n \sum_j^n |V_i V_j| [\cos(\delta_i - \delta_j)G_{ij} + \sin(\delta_i - \delta_j)B_{ij}] \quad (3.6)$$

Dan daya reaktif bisa dituliskan

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

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

Maka

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

Selanjutnya adalah menentukan perubahan nilai daya aktif dan reaktif terhadap sudut tegangan tiap bus menggunakan komponen matriks Jacobian

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

Dengan,

$$H_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (3.11)$$

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

$$J_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (3.13)$$

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

Maka,

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

Selanjutnya dari persamaan 3.6 dan 3.9 akan didapatkan nilai P dan Q awal, lalu dengan perkalian matriks jacobian akan didapatkan nilai dari

$\Delta\delta_i$ dan ΔV_i yang digunakan sebagai nilai sudut dan magnitudo tegangan iterasi selanjutnya.

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

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

3.2 Reduksi Matriks

Pada penelitian ini sistem yang digunakan adalah sistem 3 generator 9 bus yang mana merupakan sistem yang kompleks. Untuk mengurangi tingkat kompleksitas sistem maka diperlukan reduksi jaringan dalam perhitungan matematis. Metode reduksi yang digunakan dalam jaringan ini adalah reduksi Kron. Tujuan dari metode reduksi ini adalah mereduksi matriks admitansi sistem. Secara umum, matriks persamaan awal untuk reduksi kron dapat didefinisikan sebagai berikut

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

Dengan simbol n merupakan penomoran bus beban dan simbol m merupakan penomoran bus generator. Secara sederhana dapat ditulis dengan persamaan

$$\begin{bmatrix} I_n \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Metode kron mereduksi matriks admitansi dari bus selain bus generator dikarenakan tidak ada nilai arus masuk ataupun keluar dari bus tersebut. Dengan melihat kondisi tersebut, maka I_n bernilai nol, maka persamaan 3.17 menjadi berikut ini

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_n & Y_{nm} \\ Y_{nm}^t & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ E_m \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Persamaan diatas menghasilkan

$$Y_n V_n + Y_{nm} E_m = 0$$

$$V_n = -\left(\frac{Y_{nm}E_m}{Y_n}\right) = -(Y_n^{-1}Y_{nm}E_m) \quad (3.19)$$

$$Y_{nm}^t V_n + Y_{mm}E_m = I_m \quad (3.20)$$

Melalui substitusi nilai V_n dari persamaan 3.19 ke dalam persamaan 3.20, maka persamaan menjadi

$$I_m = -(Y_{nm}^t Y_n^{-1} Y_{nm} E_m)_n + Y_{mm} E_m \quad (3.21)$$

Maka persamaan reduksi bisa dituliskan

$$Y_{reduksi} = Y_{mm} - \frac{Y_{nm}^t Y_{nm}}{Y_n} \quad (3.22)$$

Dengan bentuk matrik yang sederhana, maka analisis kestabilan transien akan lebih mudah.

3.3 Pemodelan

Pemodelan sistem multimesin yang digunakan di penelitian ini adalah model *Center of Angle* (COA) atau *Center of Inertia* (COI). Metode COI menggunakan konsep titik berat [8], dalam pendefinisannya rumus COI dituliskan sebagai berikut

Maka dapat ditulis menjadi

$$M_T \delta_0 = \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \quad (3.23)$$

Dengan $\delta_i = \omega_i$ dan $\dot{\delta}_i = \dot{\omega}_i$ maka persamaan berikut ini dapat dituliskan

$$M_T \omega_0 = \sum_{i=1}^n M_i \omega_i$$

$$M_T \omega_0 = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei}(\delta))$$

$$M_T \omega_0 = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - E_i^2 G_{ii}) - 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j G_{ij} \cos \delta_{ij}$$

$$M_T \omega_0 = P_{COI} \quad (3.24)$$

$$\dot{\omega}_0 = \frac{1}{M_T} P_{COI} \quad (3.25)$$

$$\dot{\delta}_0 = \omega_0 \quad (3.26)$$

Untuk mendefinisikan sudut terbaru dan kecepatan relatif pada referensi digunakan persamaan

$$\theta_i = \delta_i - \delta_0 \text{ dan } \widetilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_0 \quad (3.27)$$

Dengan mengacu persamaan ayunan, persamaan gerak COI dapat dijelaskan sebagai berikut

$$M_i(\ddot{\widetilde{\omega}}_i + \dot{\omega}_0) = P_{mi} - P_{ei}(\theta)$$

$$M_i\ddot{\widetilde{\omega}}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - M_i\dot{\omega}_i$$

$$M_i\ddot{\widetilde{\omega}}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \quad (3.28)$$

$$\dot{\theta}_i = \widetilde{\omega}_i \quad (3.29)$$

Dimana :

M_i : Momen inersia ke i

M_T : Momen inersia total

$\dot{\omega}$: Percepatan sudut

P_m : Daya mekanis

P_e : Daya listrik

θ_i : Sudut rotor

3.4 Runge Kutta Orde 4

Metode Rung Kutta orde 4 merupakan sebuah metode numerik untuk menentukan litanan *Stable Equivalent point* sebelum dan saat gangguan dengan menggunakan persamaan differensial [5].

$$K_1 = f(x)dt$$

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

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

$$K_4 = f(x + k_3)dt$$

$$x = x + \frac{1}{6} + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (3.30)$$

Dimana

K_1 = lengkungan saat awal *time step*

K_2 = Pendekatan pertama untuk lengkungan pada pertengahan *time step*

K_3 = Pendekatan kedua pada lengkungan pertengahan *time step*

K_4 = lengkungan pada *time step* terakhir

3.5 Perumusan Masalah

3.5.1 Definisi awal

Permasalahan kestabilan transien dapat dihitung melalui kondisi keadaan awal (*Initial condition*) sebelum gangguan, selama gangguan dan setelah gangguan. Kondisi awal sebelum gangguan didefinisikan x_{pre} , ketika gangguan terjadi pada saat $t=0$. Kemudian sistem diatur oleh persamaan dinamis ketika gangguan seperti berikut,

$$\dot{x} = fF(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad (3.31)$$

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

Kurva hasil perhitungan persamaan diatas adalah berupa lintasan terjadinya gangguan (*fault on trajectory*), persamaan 3.31 dapat ditulis

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.32)$$

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

Gangguan dihilangkan saat $t = \tau$ dan sistem diatur oleh persamaan dinamis seperti berikut,

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3.33)$$

Hasil dari persamaan diatas merupakan lintasan setelah terjadi gangguan. Persamaan 3.33 dapat ditulis

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(t; x^0): R^N \rightarrow R^N \quad (3.34)$$

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

$$x^0 = X_F(\tau, x_{pre}) \quad (3.35)$$

3.5.2 Modifikasi persamaan Trapezoidal [9]

Perhitungan trapezoidal digunakan untuk persamaan 3.33 pada saat t^k dinotasikan dengan x^k , sehingga persamaan trapesoidal konvensional menjadi

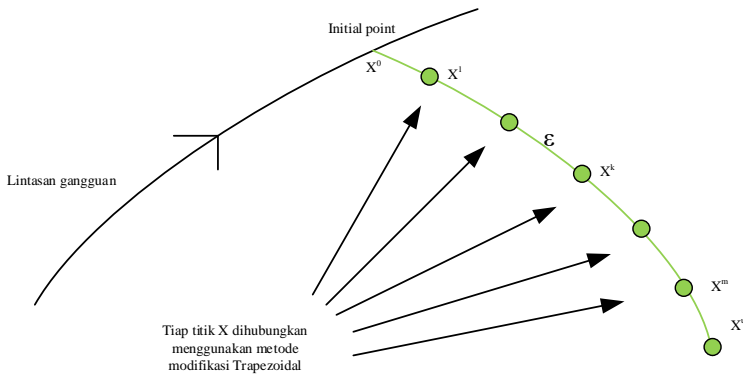
$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(x^{k+1} + x^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.36)$$

Dimana

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

Pada persamaan ini k digunakan sebagai nomor transisi terhadap waktu. Sesuai dengan definisi *critical trajectory* yakni lintasan yang dimulai dari lintasan gangguan sampai pada titik kritisnya. Modifikasi persamaan trapesoidal menitik beratkan pada kondisi ketika gangguan dihilangkan saat CCT dan variabel-variabel berada pada kondisi kritis. Gambar 3.3 Menunjukkan lintasan kritis (*critical trajectory*) yang dimulai dari titik awal x^0 yakni saat pemutusan gangguan pada CCT dan berakhir di titik akhir x^u yakni saat kondisi kritis atau saat mencapai UEP (*Unstable Equilibrium Point*). Permasalahan yang dapat terjadi dalam penentuan lintasan kritis adalah waktu yang tak berhingga untuk mencapai keadaan UEP. Untuk permasalahan yaitu pada bola yang bergerak keatas menuju puncak bukit (UEP), yang energi kinetik bernilai sama dengan energi potensial saat UEP. Bola tidak dapat mencapai UEP dengan waktu tertentu karena kecepatannya cenderung menjadi nol ketika mendekati puncak bukit (UEP). Untuk mengatasi permasalahan tersebut, metode baru untuk integrasi numerik telah dikembangkan [3]. Pertama, jarak antara dua titik dalam persamaan 3.35 didefinisikan sebagai berikut

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2}|x^{k+1} + x^k|(t^{k+1} - t^k) \quad (3.37)$$



Gambar 3.3 Konsep persamaan metode Trapezoidal

Titik awal x^0 dan titik akhir x^u dihubungkan dengan titik-titik lintasan, jarak antar titik lintasan disimbolkan dengan epsilon ϵ . Lalu dengan persamaan 3.37 persamaan waktu diubah dengan jarak sebagai berikut

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|x^{k+1} + x^k|} \epsilon \quad (3.38)$$

Dengan substitusi persamaan 3.36 ke persamaan 3.38, maka persamaan baru menjadi

$$x^{k+1} - x^k \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \epsilon = 0$$

Dengan persamaan diatas, integrasi numerik terhadap waktu berubah menjadi terhadap jarak. Transformasi ini dapat menggambarkan lintasan kritis dengan waktu berhingga.

3.5.3 Kondisi kritis saat hilangnya Sinkronisasi [9]

Untuk kasus sistem *single machine*, kekuatan sinkronisasi akan hilang ketika $\partial T / \partial \theta = 0$ atau $\partial P / \partial \theta = 0$. Dimana T dan P masing-masing adalah torsi dan daya sinkronisasi, sedangkan θ adalah sudut rotor.

Dalam kasus multi mesin dapat ditulis berdasarkan kondisi hilangnya kekuatan sinkronisasi dapat dirumuskan dengan matriks koefisien sebagai berikut

$$0 = \left| \frac{\partial P}{\partial \theta} \right| \cdot v \text{ dengan } v \neq 0 \quad (3.39)$$

Dimana $v \in R^{NGen}$ adalah *eigenvector* terhubung dengan matrik *zero eigenvalue* $[\partial P / \partial \theta] \in R^{NGen \times NGen}$, dan $NGen$ adalah jumlah dari generator. Dengan kondisi *eigenvector* harus menyesuaikan dengan perubahan arah dari θ . Hal tersebut dapat ditulis dengan persamaan berikut dengan $K_s \in R$

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \quad (3.40)$$

Kondisi 3.38 dan 3.39 dapat diasumsikan sebagai titik akhir dalam menentukan lintasan kritis nantinya. Persamaan yang menggambarkan kondisi tetap pada torsi atau daya sinkronisasi yaitu

$$\dot{P} = 0$$

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

$$\dot{P} = \left| \frac{\partial P}{\partial \theta} \right| \cdot \dot{\theta} \quad (3.41)$$

3.5.4 Critical Trajectory Metode Losing Synchronism

Perumusan masalah untuk memperoleh kondisi kritis sebagai titik akhir kestabilan transien adalah sebagai berikut

$$\min_{x^0, x^1, \dots, x^{m+1}, \varepsilon, \tau, K_s, v} \{ \sum_{k=0}^m (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m+1})' W (\mu^{m+1}) \} \quad (3.42)$$

Dimana $x^k \in R^N$, $\varepsilon \in R$, $\tau \in R$, $K_s \in R$, $v \in R^{NGen}$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \varepsilon$$

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (3.43)$$

Dengan kondisi batasan

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.44)$$

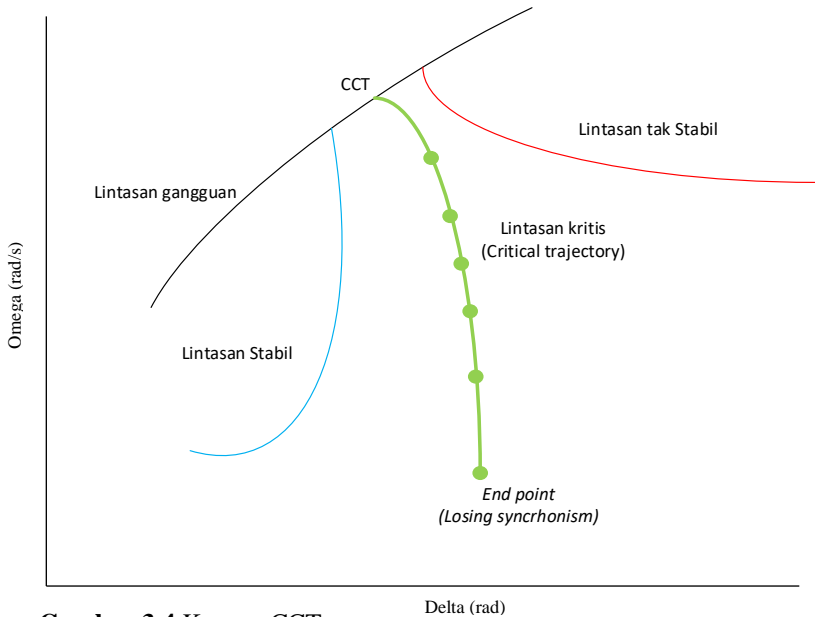
$$\mu^{m+1} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot v \\ v - K_S \cdot \theta^{m+1} \\ |v| - 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (3.45)$$

Dimana W adalah matriks pembobotan yang memiliki banyak baris dan kolom yang sama (bujur sangkar) dengan syarat diagonalnya bernilai positif dan tidak mempengaruhi konvergensi atau akurasi hasil yang diperoleh. Oleh karena itu, matriks identitas digunakan pada W . Minimalisasi pada persamaan 3.42 menghasilkan μ^k nol. Persamaan trapezoidal akan menghubungkan ke semua titik μ^k dari nilai $k=0$ hingga $k=m+1$. Himpunan titik-titik x^k ini merepresentasikan lintasan kritis, dimana ε secara langsung diperoleh ketika banyaknya integrasi (m) ditentukan. Besar nilai m merupakan parameter yang penting yang berdampak pada akurasi dan waktu perhitungan dikarenakan m proporsional dengan perumusan minimalisasi.

Persamaan 3.44 merupakan kondisi batasan untuk titik awal x^0 , dimana persamaan ini menunjukkan lintasan gangguan sebagai fungsi dari waktu pemutusan, τ . Sedangkan persamaan 3.45 adalah kondisi batasan untuk *end point*, dimana θ^{m+1} , *sub-vector* dari x^{m+1} memenuhi kondisi kritis sinkronisasi.

3.6 Menentukan Nilai *Critical Clearing Time*

Critical clearing Time merupakan titik awal pada lintasan kritis (*critical trajectory*) pada lintasan gangguan. Penjelasan lebih lanjut digambarkan pada gambar



Gambar 3.4 Konsep CCT

Dalam hal ini dapat diketahui bahwa sistem kembali stabil apabila gangguan diputus sebelum mencapai CCT dan apabila diputus setelah itu maka system menjadi tidak stabil. Akurasi dari lintasan kritis dapat ditentukan oleh m dan besar nilai. Kondisi batas akhir (*end point condition*) pada metode ini merupakan tambahan jika dibandingkan dengan metode konvensional *numerical integration*, yaitu metode yang digunakan sebagai formulasi nilai awal pada metode ini. Dalam metode konvensional, $error \mu k$ diakumulasi seiring bertambahnya k sehingga titik akhir (x_u) memiliki kesalahan yang cukup besar. Tapi dalam metode ini, sesuai persamaan yang dihasilkan untuk titik akhir yaitu *losing synchronism*, menyelesaikan persamaan berlebih di setiap titik dengan meminimasi persamaan 3.42 sehingga $error \mu k$ tersebar di setiap titik dengan merata, dan titik akhir memiliki kesalahan yang kecil.

3.7 Modifikasi Persamaan Sistem dengan Penambahan Penyimpan Energi Super Kapasitor

Pada Penelitian ini Sistem penyimpanan energi Super Kapasitor atau biasa disebut *Super Capacitor Energy Storage* (SCES) diasumsikan terpasang di bus generator secara paralel dan dalam rangkaiannya sudah termasuk *rectifier/inverter*. Ketika sistem mengalami gangguan tiga fasa, osilasi *first swing* akan bernilai sangat besar dan dapat menyebabkan peningkatan nilai sudut rotor generator sehingga sistem berpotensi kehilangan sinkronisasinya. Pemasangan SCES dalam sistem dapat meredam osilasi yang terjadi. SCES diasumsikan selalu berada dalam kondisi kosong, sehingga saat terjadi gangguan dan daya elektrik turun SCES langsung dapat menggantikan daya elektrik yang turun. Model persamaan matematika yang digunakan saat super kapasitor meredam osilasi saat terjadi gangguan adalah sebagai berikut [6].

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - M_i \dot{\omega}_i - P_{SCES} \quad (3.45)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - P_{SCES} \quad (3.46)$$

Keterangan

- M = Momen inersia
- $\dot{\omega}$ = Kecepatan sisnkron (rad/sekon)
- P_{SCES} = Daya SCES (p.u)

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

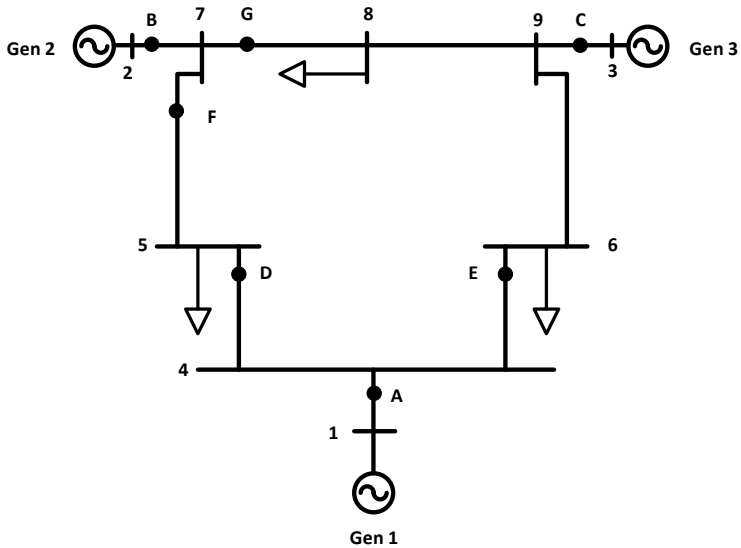
Bab 4 ini berisikan hasil serta analisis dari simulasi penentuan nilai optimal Super kapasitor pada sistem IEEE 3 generator 9 bus. Dengan hasil yang diharapkan yaitu mengetahui pengaruh dari pemasangan Super kapasitor terhadap kestabilan sistem tenaga sesaat setelah terjadi gangguan 3 fasa. Simulasi dilakukan dengan 3 keadaan, sistem tanpa Super kapasitor, setelah pemasangan, dan sistem dengan memperhatikan waktu operasi proteksi yang ada.

Nilai *Critical Clearing Time* hasil simulasi metode *Critical Trajectory* digunakan untuk menentukan nilai Super kapasitor yang dipasang. Nilai CCT ini berdasarkan waktu operasi pemutusan *Circuit breaker*. Adapun tahapan untuk menentukan *sizing* super kapasitor adalah sebagai berikut:

1. Simulasi aliran daya kondisi normal
2. Menentukan lokasi dan simulasi gangguan 3 fasa pada saluran sistem
3. Menghitung nilai CCT secara langsung melalui simulasi menggunakan metode *Critical trajectory* berbasis *losing synchronism*.
4. Simulasi penambahan super kapasitor pada sistem dengan dilanjutkan menghitung nilai CCT
5. Menentukan kapasitas super kapasitor berdasarkan CCT hasil simulasi dengan acuan waktu operasi sistem proteksi

4.1 Penentuan Parameter Awal Sistem 3 Generator 9 Bus dan Simulasi Aliran Daya

Simulasi dilakukan pada sistem 3 generator 9 bus tanpa kontroler AVR dan *speed governour* serta tanpa penambahan *dampner winding*. Generator yang berfungsi sebagai *swing/slack* adalah generator 1 dan asumsi dengan jenis beban statis terpasang di bus 4, 6, dan 8. Saluran terpasang menggunakan asumsi *double circui*.



Gambar 4.1 Sistem 3 Generator 9 Bus

Gambar diatas merupakan ilustrasi *Single Line Diagram* dari sistem 3 generator 9 bus [10]. Parameter-parameter yang perlu diinputkan terlebih dahulu sebelum dilakukan perhitungan CCT, antara lain data sistem seperti impedansi saluran, kapasitas pembangkit dan beban, serta parameter awal yang diperoleh dari aliran daya.

Tabel 4.1 Data Transmisi Sistem 3 Generator 9 Bus

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

Tabel 4.2 Data bus sistem 3 Generator 9 Bus

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (Mvar)	P Beban (MW)	Q Beban (Mvar)
1	200	0	0	0
2	163	0	0	0
3	85	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	125	50
6	0	0	90	30
7	0	0	0	0
8	0	0	100	35
9	0	0	0	0

Tahapan awal dalam perhitungan CCT adalah aliran daya sistem untuk memperoleh parameter awal yang akan digunakan pada proses selanjutnya. Hasil yang diperoleh dalam aliran daya antara lain daya mekanis generator, daya generator, tegangan bus generator dan tegangan generator.

Tabel 4.3 Hasil iterasi aliran daya untuk generator

Gen	Pm (p.u)	V (p.u)	Ea (p.u)
1	0,8691	1,04	1,063
2	1,63	1,025	1,0535
3	0,85	1,025	1,0284

Setelah didapat parameter-parameter pada tabel 4.3, dilanjutkan dengan perhitungan CCT secara langsung menggunakan metode *Critical Trajectory* berbasis *Losing Synchronism*.

4.2 Perhitungan nilai *Critical Clearing Time* pada sistem 3 generator 9 bus Sebelum Penambahan Super Kapasitor

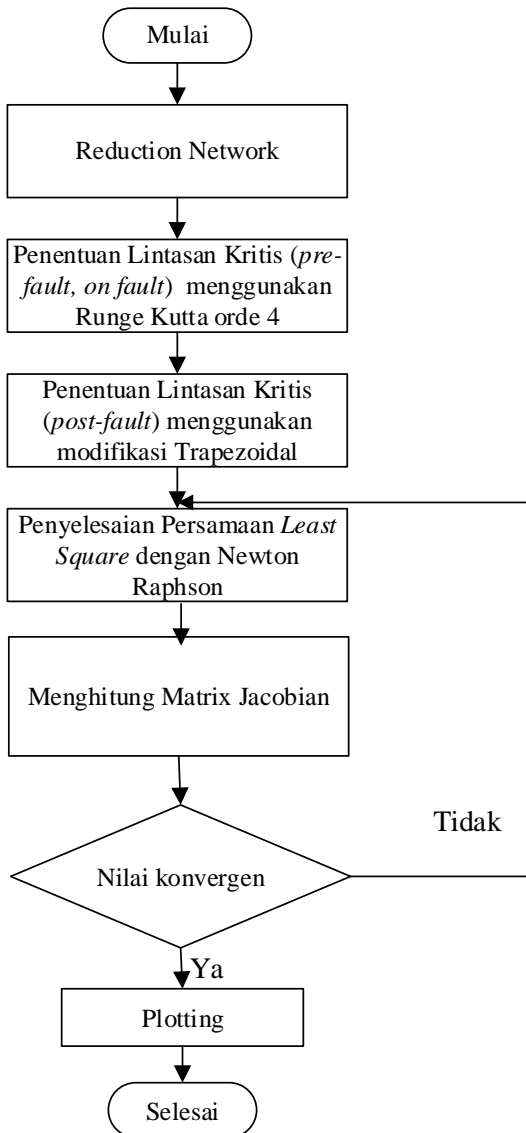
Simulasi sebelum penambahan super kapasitor dilakukan untuk mendapatkan nilai awal sebagai acuan untuk pembandingan nilai CCT di akhir. Selanjutnya data yang perlu ditentukan adalah menentukan titik letak gangguan hubung singkat 3 fasa pada sistem yang nantinya akan diisolasi, lalu dengan perhitungan *Critical Trajectory* berbasis *losing synchronism* akan didapatkan nilai CCT sistem. Dari gambar 4.1 telah

ditunjukkan *single line diagram* dari sistem 3 generator 9 bus dengan titik disetiap saluran menandakan letak gangguan.

- A : Gangguan pada salah satu saluran antara bus 1 dengan 4
- B : Gangguan pada salah satu saluran antara bus 2 dengan 7
- C : Gangguan salah satu pada saluran antara bus 3 dengan 9
- D : Gangguan salah satu pada saluran antara bus 4 dengan 5
- E : Gangguan salah satu pada saluran antara bus 4 dengan 6
- F : Gangguan salah satu pada saluran antara bus 7 dengan 5
- G : Gangguan salah satu pada saluran antara bus 7 dengan 8

Sebelum melakukan pemodelan perhitungan CCT melalui persamaan ayunan, dilakukan reduksi jaringan terlebih dahulu. Reduksi matriks jaringan yang bertujuan menyederhanakan matriks sistem dengan node yang tidak diperhitungkan. Arus beban diasumsikan bernilai nol saat terjadi gangguan. Oleh karena itu hasil reduksi matriks tersisa hanya matriks generator. Gambar 4.2 adalah diagram alir tahapan perhitungan nilai *Critical Clearing Time* menggunakan metode *Critical Trajectory* berdasarkan lepasnya sinkronisasi (*losing synchronism*).

Simulasi Perhitungan CCT dimisalkan salah satu titik pada saluran transmisi terjadi hubung singkat 3 fasa kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Melalui tabel 4.4 diberikan nilai CCT perhitungan secara langsung melalui metode *Critical Trajectory* dan melalui metode simulasi numerik konvensional (TDS).



Gambar 4.2 Tahapan dalam Perhitungan CCT secara Langsung

Tabel 4.4 Hasil perhitungan nilai CCT sistem 3 Generator 9 Bus tanpa Super Kapasitor

Fault Point	Open Line	Metode Perhitungan Langsung		Metode Konvensional (TDS)		Error (%)
		CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	1-4	0,3431	0,5825	0,34-0,35	69,9	0
B	2-7	0,2178	0,3500	0,21-0,22	42	0
C	3-9	0,2567	0,3636	0,25-0,27	43,632	0
D	4-5	0,3232	0,3285	0,32-0,33	39,42	0
E	4-6	0,3242	0,3558	0,32-0,33	42,696	0
F	7-5	0,2223	0,3451	0,22-0,24	41,412	0
G	7-8	0,2368	0,4138	0,23-0,24	49,656	0

Hasil simulasi tabel 4.4 menunjukkan perbandingan antara nilai CCT metode yang diusulkan (*Critical Trajectory* berdasarkan *Losing Synchronism*) dengan nilai CCT dari metode numerik konvensional (TDS). Metode TDS mendapatkan nilai CCT berupa rentang waktu antara pemutusan stabil dengan tidak stabil. Perhitungan dengan metode yang diusulkan adalah berupa nilai dari CCT langsung.

Nilai CCT yang ditunjukkan oleh metode konvensional merupakan acuan sebagai hasil dari perhitungan metode yang diusulkan. Terlihat bahwa hasil dari simulasi sesuai dengan yang diharapkan. Misalkan pada gangguan titik A metode yang diusulkan memperoleh CCT sebesar 0,3431 detik. Hasil simulasi menggunakan metode konvensional untuk gangguan di titik A adalah rentang antara 0,34 hingga 0,35 detik. Hal ini menunjukkan bahwa sistem stabil saat gangguan dihilangkan (*open line*) pada detik ke 0,34 dan tidak stabil pada detik ke 0,35. Dapat dilihat bahwa hasil simulasi dari metode yang diusulkan masih di dalam rentang simulasi konvensional. Perhitungan *error* diperoleh dengan persamaan berikut :

$$error = \frac{nilai\ cct - tcu\ atau\ tcs}{tcu\ atau\ tcs} \times 100\% \quad (4.1)$$

Dimana *tcu* atau *tcs* merupakan rentang nilai CCT dari hasil simulasi metode konvensional, *tcu* merupakan batas pemutusan yang mengakibatkan sistem tidak stabil dan *tcs* adalah batas pemutusan yang mana sistem tetap stabil. Dengan catatan apabila hasil nilai CCT dari hasil metode yang diusulkan berada dalam rentang CCT metode konvensional

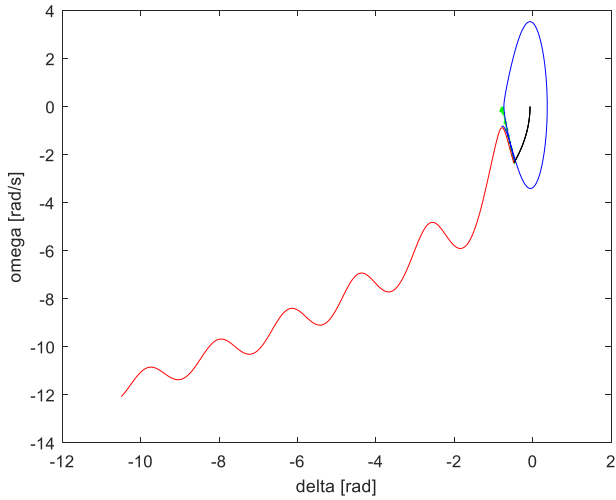
dianggap $error = 0$. Besar nilai $error$ yang diizinkan untuk hasil adalah dibawah 5%. Hasil simulasi yang diperoleh tidak terdapat $error$ sehingga nilai CCT hasil simulasi bisa diterapkan. Waktu yang diperlukan untuk simulasi (*CPU time*) tergantung pada spesifikasi komputer yang digunakan. Pada metode konvensional waktu simulasi didapatkan dengan asumsi bahwa dilakukan 12 kali percobaan untuk *trial and error* agar didapatkan nilai tcu dan tes .

4.2.1 Analisis Grafik CCT Hasil Simulasi *Critical Trajectory* di tiap Titik Gangguan 3 Fasa

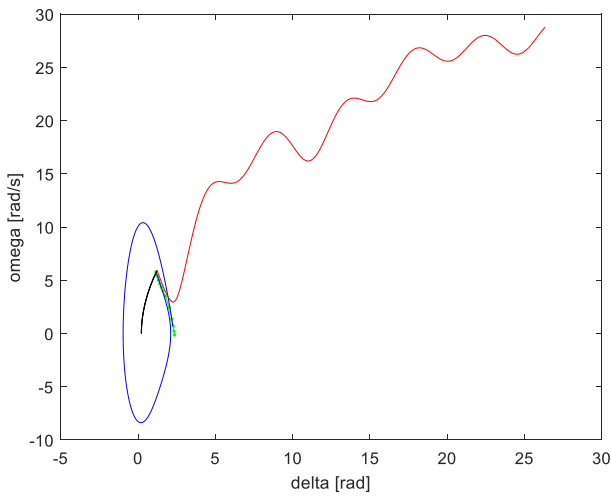
Grafik hasil simulasi adalah berupa *plotting* karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam radian/detik terhadap sudut rotor (δ) dalam radian pada generator. Grafik hasil simulasi yang ditampilkan terdapat 4 warna kurva, yang digunakan yakni Hitam, biru, merah dan hijau. Kurva warna hitam menunjukkan lintasan saat terjadinya gangguan, warna biru menunjukkan kondisi stabil saat gangguan dihilangkan kurang dari nilai CCT, warna merah menunjukkan kondisi tidak stabil saat gangguan dihilangkan melebihi nilai CCT sedangkan warna hijau menunjukkan kurva hasil nilai CCT yang diperoleh melalui metode yang diusulkan. Berikut ini hanya akan ditampilkan grafik di titik gangguan A dan D karena sudah dianggap mewakili keseluruhan grafik di tiap titik gangguan.

a. Titik Gangguan A

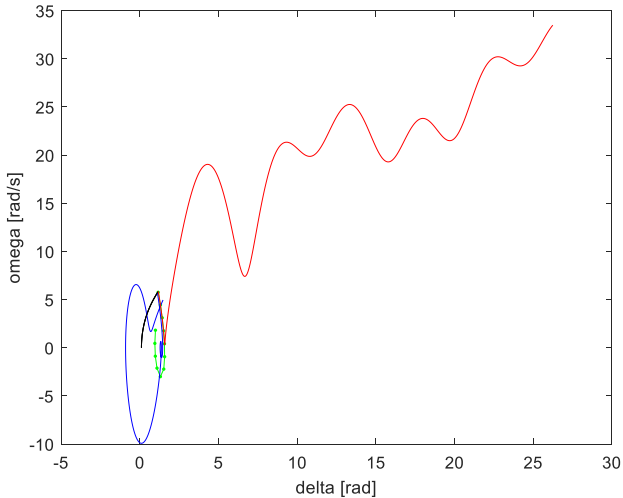
Gangguan di titik A pada sistem artinya dilakukan simulasi gangguan 3 fasa pada salah satu saluran antara bus 1 dan bus 4. Hasil dari simulasi didapatkan hasil dari metode *Critical trajectory* adalah 0,3431 detik, sedangkan hasil dari metode konvensional adalah antara 0,34-0,35 detik.



Gambar 4.3 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 1 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik A



Gambar 4.4 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik A

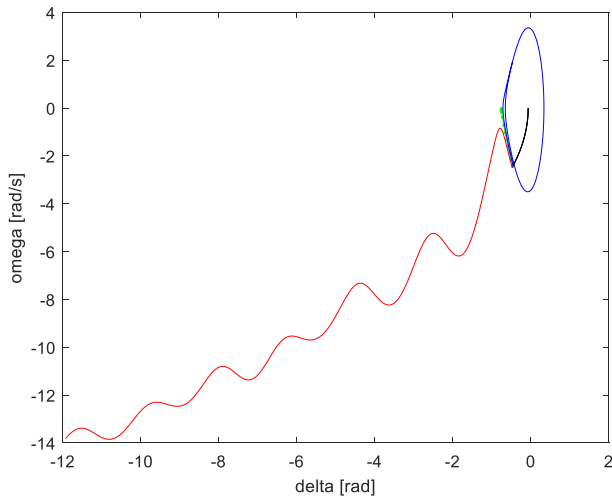


Gambar 4.5 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 3 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik A

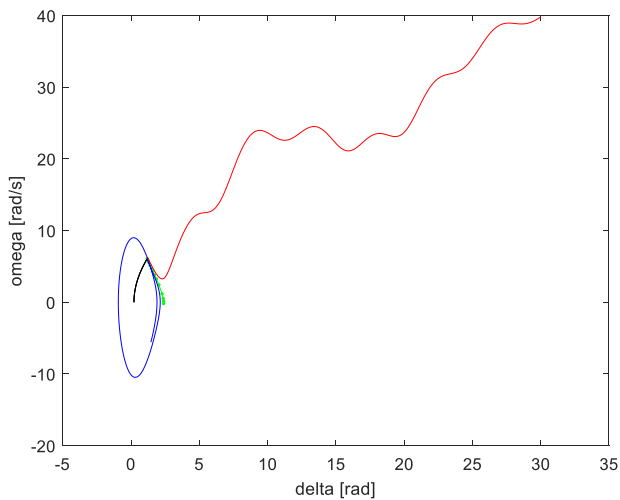
Dari gambar 4.3-4.5 dapat dilihat bahwa saat dilakukan pemutusan 0,34 detik yaitu yang digambarkan kurva warna biru (tcs), kondisi rotor beresilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) yang berarti kondisi sistem stabil. Sedangkan jika dilakukan pemutusan gangguan pada 0,35 detik yaitu yang digambarkan kurva warna merah (tcu), kondisi rotor mengalami kenaikan percepatan seiring dengan bertambahnya pergeseran sudut rotor mengakibatkan kondisi yang tidak stabil karena generator kehilangan sinkronisasi (*Loss of Synchron*). Kurva warna hijau menunjukkan hasil dari metode yang diusulkan, terlihat bahwa kurva berada di antara kondisi stabil dan tidak stabil. Hal ini dapat dikatakan hasil simulasi sesuai dengan hasil simulasi metode konvensional.

b. Titik Gangguan D

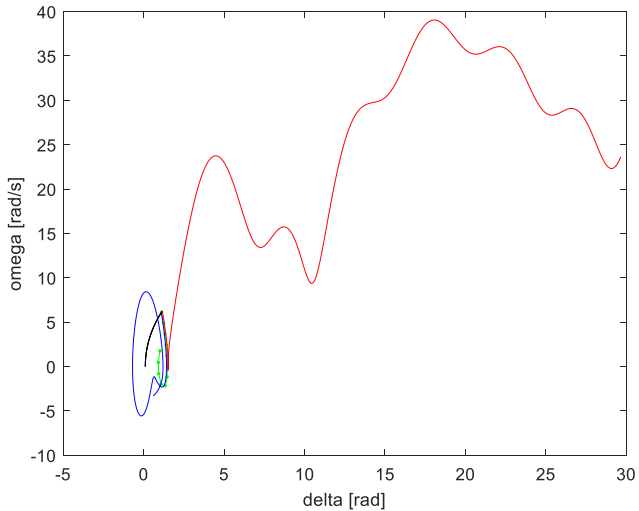
Gangguan di titik D pada sistem artinya dilakukan simulasi gangguan 3 fasa pada salah satu saluran antara bus 2 dan bus 7. Hasil dari simulasi didapatkan hasil dari metode *Critical trajectory* adalah 0,3232 detik, sedangkan hasil dari metode konvensional adalah antara 0,32-0,33 detik.



Gambar 4.6 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 1 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik D



Gambar 4.7 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 bus saat terjadi gangguan 3 fasa di titik D



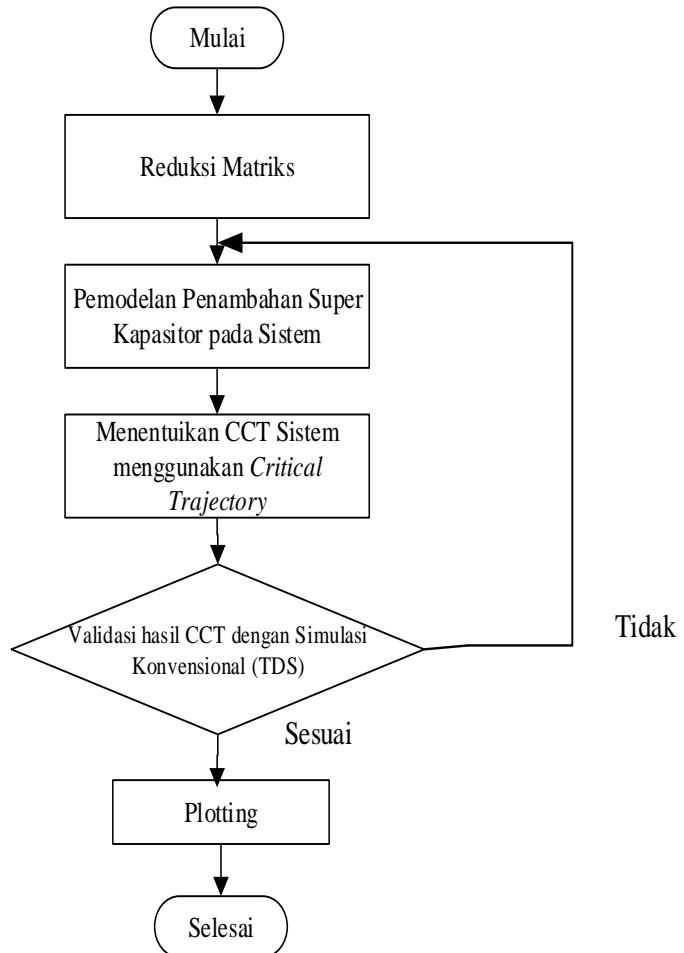
Gambar 4.8 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 3 bus saat terjadi gangguan 3 fasa di titik D

Dari gambar 4.6-4.8 dapat dilihat bahwa saat dilakukan pemutusan 0,32 detik yaitu yang digambarkan kurva warna biru (tcs), kondisi rotor beresilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) yang berarti kondisi sistem stabil. Sedangkan jika dilakukan pemutusan gangguan pada 0,33 detik yaitu yang digambarkan kurva warna merah (tcu), kondisi rotor mengalami kenaikan percepatan seiring dengan bertambahnya pergeseran sudut rotor mengakibatkan kondisi yang tidak stabil karena generator kehilangan sinkronisasi (*Loss of Synchron*). Kurva warna hijau menunjukkan hasil dari metode yang diusulkan, terlihat bahwa kurva berada di antara kondisi stabil dan tidak stabil. Hal ini dapat dikatakan hasil simulasi sesuai dengan hasil simulasi metode konvensional.

4.3 Perhitungan nilai *Critical Clearing Time* pada sistem 3 generator 9 bus dengan Penambahan Super Kapasitor

Pada subbab ini akan disimulasikan perhitungan *critical clearing time* dengan penambahan super kapasitor. Super kapasitor dipasang pada bus generator, karena pemasangan super kapasitor bertujuan untuk meredam osilasi dari daya elektrik generator disaat terjadi gangguan hubung singkat

3 fasa. Sehingga mampu meningkatkan kestabilan sistem dengan menambah durasi CCT. Pemasangan super kapasitor diletakkan pada bus generator 2 yang dianggap sebagai generator kritis [11].



Gambar 4.9 Tahapan perhitungan CCT dengan Penambahan Super Kapasitor

Pada gambar 4.5 terdapat tahapan penentuan CCT dengan *critical trajectory* yang sudah digambarkan tahapannya pada gambar 4.2. Simulasi akan dilakukan dengan dimisalkan salah satu titik pada saluran transmisi terjadi hubung singkat 3 fasa kemudian akan dihitung nilai CCT secara langsung. Melalui tabel dibawah ini diberikan nilai CCT perhitungan secara langsung melalui metode *Critical Trajectory* dan melalui metode simulasi numerik konvensional (TDS).

4.3.1 Analisis Grafik CCT Hasil Simulasi *Critical Trajectory* berdasarkan *Lossing Synchronism* di tiap Titik Gangguan 3 Fasa

Titik gangguan yang disimulasikan pada subbab ini sama dengan titik gangguan pada subbab 4.2.1. Dengan penambahan Super kapasitor dari 0,1 hingga 1 pu dan dipasang pada bus generator 2. Dengan 1 pu kapasitor bernilai sama dengan 100 MVA.

a. Titik Gangguan A

Gangguan hubung singkat dilakukan pada saluran antara bus 1 dan bus 4. Hasil simulasi metode yang diusulkan akan divalidasi datanya dari hasil simulasi metode konvensional (TDS).

Tabel 4.5 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik A

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,1	0,3678	0,3943	0,36-0,37	47,316
0,2	0,3952	0,4310	0,39-0,40	51,72
0,3	0,4262	0,4320	0,42-0,43	51,84
0,4	0,4610	0,4440	0,46-0,47	53,28
0,5	0,5151	0,3243	0,50-0,51	38,916
0,6	0,5693	0,3989	0,56-0,57	47,868
0,7	0,6241	0,4550	0,62-0,63	54,6
0,8	0,7143	0,5460	0,71-0,72	65,52
0,9	0,8360	0,5220	0,83-0,84	62,64
1,0	1,0547	0,5368	1,02-1,06	64,416

Pada saat gangguan di titik A, didapatkan hasil CCT dalam perhitungan metode *Critical trajectory* menunjukkan kenaikan nilai seiring dengan penambahan nilai super kapasitor. Tidak terdapat *error* dalam perhitungan jika dibandingkan dengan hasil metode konvensional.

b. Titik gangguan B

Gangguan hubung singkat dilakukan pada saluran antara bus 2 dan bus 7. Hasil simulasi metode yang diusulkan akan divalidasi datanya dari hasil simulasi metode konvensional (TDS).

Tabel 4.6 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik B

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,1	0,2355	0,3943	0,23-0,24	47,316
0,2	0,2523	0,4310	0,25-0,26	51,72
0,3	0,2677	0,3500	0,26-0,27	42
0,4	0,2919	0,5324	0,28-0,30	63,888
0,5	0,3122	0,3456	0,31-0,32	41,472
0,6	0,3380	0,3876	0,33-0,34	46,512
0,7	0,3668	0,3452	0,36-0,37	41,424
0,8	0,3994	0,4786	0,4-0,41	57,432
0,9	0,4418	0,4872	0,44-0,45	58,464
1,0	0,4953	0,5368	0,49-0,50	64,416

Pada saat gangguan di titik B, didapatkan hasil CCT dalam perhitungan metode *Critical trajectory* tertinggi pada 0,4953. Pada pemasangan super kapasitor di nilai 0,8 hasil dari metode *critical trajectory* tidak berada pada rentang waktu hasil simulasi TDS. Hal ini menunjukkan adanya *error* dalam perhitungan, namun *error* yang terjadi tidak menyentuh angka 3% maka hasil perhitungan ini masih bisa diterapkan.

c. Titik Gangguan di C

Gangguan hubung singkat dilakukan pada saluran antara bus 3 dan bus 9. Hasil simulasi metode yang diusulkan akan divalidasi datanya dari hasil simulasi metode konvensional (TDS).

Tabel 4.7 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik C

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,1	0,2849	0,3943	0,28-0,30	47,316
0,2	0,3257	0,4310	0,32-0,33	51,72

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,3	0,3628	0,4320	0,36-0,37	51,84
0,4	0,4247	0,5678	0,42-0,43	68,136
0,5	0,5200	0,4387	0,44-0,45	52,644
0,6	0,7555	0,5450	0,54-0,58	65,4
0,7	divergen	-	divergen	-
0,8	divergen	-	divergen	-
0,9	0,5820	0,5436	0,62-0,63	65,232
1,0	0,4518	0,4321	0,48-0,49	51,852

Berdasarkan tabel 4.7 hasil simulasi perhitungan CCT dengan metode *critical trajectory* mengalami *error* sebesar 15% pada nilai penambahan super kapasitor sebesar 0,5 dan 0,6 lalu pada penambahan super kapasitor di nilai 0,7 dan 0,8 hasil dari TDS maupun metode yang diusulkan tidak mendapatkan hasil dikarenakan simulasi yang tidak mencapai titik konvergen. Lalu pada penambahan di nilai 0,9 dan 1 pu, metode *Critical trajectory* mengalami *error* sebesar -6 %. Dengan hasil ini menunjukkan bahwa metode yang diusulkan masih memiliki kekurangan.

d. Gangguan di Titik D

Gangguan hubung singkat dilakukan pada saluran antara bus 4 dan bus 5. Hasil simulasi metode yang diusulkan akan divalidasi datanya dari hasil simulasi metode konvensional (TDS).

Tabel 4.8 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik D

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,1	0,3446	0,3943	0,34-0,35	47,316
0,2	0,3679	0,4310	0,36-0,37	51,72
0,3	0,3937	0,4320	0,39-0,40	51,84
0,4	0,4228	0,4440	0,42-0,42	53,28
0,5	0,456	0,3243	0,45-0,45	38,916
0,6	0,4943	0,3989	0,49-0,50	47,868
0,7	0,5385	0,4550	0,53-0,54	54,6
0,8	0,6059	0,5460	0,60-0,61	65,52

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,9	0,6818	0,5220	0,69-0,69	62,64
1,0	0,7760	0,5368	0,77-0,78	64,416

Pada saat gangguan di titik D, didapatkan hasil CCT dalam perhitungan metode *Critical trajectory* tertinggi pada 0,776 s. Tidak terdapat *error* dalam perhitungan jika dibandingkan dengan hasil metode konvensional.

e. Titik Gangguan di E

Gangguan hubung singkat dilakukan pada saluran antara bus 4 dan bus 6. Hasil simulasi metode yang diusulkan akan divalidasi datanya dari hasil simulasi metode konvensional (TDS).

Tabel 4.9 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik E

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,1	0,3453	0,3943	0,34-0,35	47,316
0,2	0,3683	0,4310	0,36-0,37	51,72
0,3	0,3937	0,3500	0,39-0,40	42
0,4	0,4223	0,5324	0,42-0,42	63,888
0,5	0,4549	0,3456	0,45-0,45	41,472
0,6	0,4981	0,3876	0,49-0,50	46,512
0,7	0,5456	0,3452	0,53-0,54	41,424
0,8	0,6047	0,4786	0,60-0,61	57,432
0,9	0,6799	0,4872	0,69-0,69	58,464
1,0	0,7778	0,5368	0,75-0,78	64,416

Pada saat gangguan di titik E, didapatkan hasil CCT dalam perhitungan metode *Critical trajectory* tertinggi pada 0,7778 s. Tidak terdapat *error* dalam perhitungan jika dibandingkan dengan hasil metode konvensional.

f. Titik Gangguan di F

Gangguan hubung singkat dilakukan pada saluran antara bus 7 dan bus 5. Hasil simulasi metode yang diusulkan akan divalidasi datanya dari hasil simulasi metode konvensional (TDS).

Tabel 4.10 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik F

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,1	0,2374	0,3943	0,23-0,25	47,316
0,2	0,254	0,4310	0,25-0,27	51,72
0,3	0,2722	0,4320	0,27-0,29	51,84
0,4	0,292	0,4440	0,29-0,31	53,28
0,5	0,3138	0,3243	0,32-0,33	38,916
0,6	0,3466	0,3989	0,34-0,36	47,868
0,7	0,3762	0,4550	0,38-0,39	54,6
0,8	0,4115	0,5460	0,42-0,43	65,52
0,9	0,4550	0,5220	0,46-0,47	62,64
1,0	0,5103	0,5368	0,51-0,53	64,416

Pada saat gangguan di titik F, didapatkan hasil CCT dalam perhitungan metode *Critical trajectory* tertinggi pada 0,5103 s. Tidak terdapat *error* dalam perhitungan jika dibandingkan dengan hasil metode konvensional.

g. Titik Gangguan di G

Gangguan hubung singkat dilakukan pada saluran antara bus 7 dan bus 8. Hasil simulasi metode yang diusulkan akan divalidasi datanya dari hasil simulasi metode konvensional (TDS).

Tabel 4.11 Hasil perhitungan CCT saat gangguan di titik G

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,1	0,2521	0,3635	0,25-0,26	43,62
0,2	0,2589	0,3603	0,27-0,28	43,236
0,3	0,2874	0,338	0,28-0,29	40,56
0,4	0,308	0,3367	0,30-0,32	40,404
0,5	0,3312	0,3247	0,33-0,34	38,964
0,6	0,3579	0,3238	0,36-0,37	38,856

Nilai Super Kapasitor(pu)	Metode <i>Critical Trajectory</i>		Metode Konvensional	
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)
0,7	0,3892	0,3382	0,39-0,40	40,584
0,8	0,4265	0,3157	0,43-0,44	37,884
0,9	0,4717	0,3575	0,47-0,48	42,9
1,0	0,5284	0,3074	0,53-0,54	36,888

Penambahan kapasitas 1cpu super kapasitor meningkatkan nilai CCT menjadi 0,5284. Pada nilai super kapasitor 0,6 pu; 0,7 pu; 0,8 pu; dan 1 pu terdapat *error* jika dibandingkan metode konvensional. Namun *error* ini bersifat minus yaitu nilai CCT tidak melebihi waktu pemutusan tidak stabil dari metode konvensional, maka hasil ini bisa diterapkan.

4.4 Penentuan Nilai Super Kapasitor dengan Mengacu Waktu Operasi Sistem Proteksi

Critical clearing time merupakan waktu maksimal yang diizinkan penghilangan/pemutusan gangguan 3 fasa pada saluran oleh *circuit breaker*. Apabila waktu operasi pemutusan gangguan melebihi dari CCT maka sistem tidak akan stabil. Fungsi dari penambahan super kapasitor adalah untuk meningkatkan nilai CCT pada sistem untuk setiap letak titik gangguan. Tabel 4.12 akan menunjukkan perbandingan kenaikan nilai CCT tiap titik gangguan. Untuk gangguan di titik C tidak termasuk dalam tabel 4.12 karena data pada titik C tidak lengkap yang disebabkan karena terdapat *error* pada hasil CCT yang dihasilkan dari metode yang diusulkan dan adanya kasus simulasi tidak konvergen di nilai 0,7 dan 0,8 p.u.

Tabel 4.12 Nilai CCT di setiap titik gangguan dengan penambahan Super Kapasitor

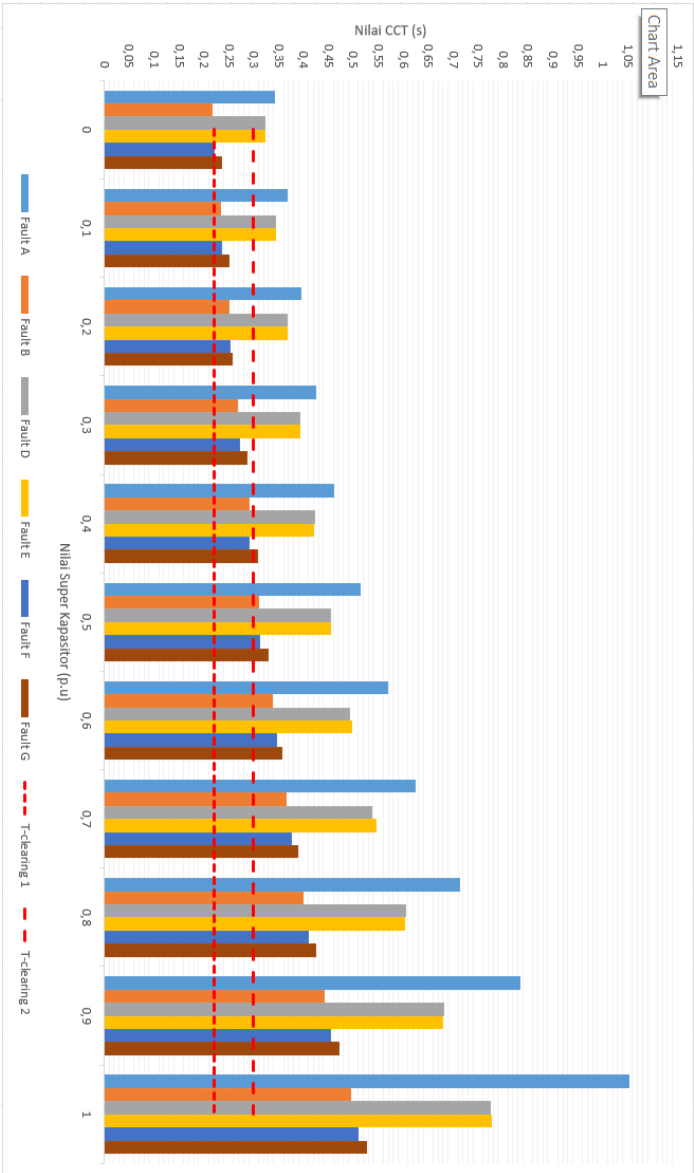
SC (p.u)	Nilai CCT tiap titik gangguan (s)					
	Titik A	Titik B	Titik D	Titik E	Titik F	Titik G
0,0	0,3431	0,2178	0,3232	0,3242	0,2223	0,2521
0,1	0,3678	0,2355	0,3446	0,3453	0,2374	0,2589
0,2	0,3952	0,2523	0,3679	0,3683	0,254	0,2874
0,3	0,4262	0,2677	0,3937	0,3937	0,2722	0,308
0,4	0,461	0,2919	0,4228	0,4223	0,292	0,3312
0,5	0,5151	0,3122	0,456	0,4549	0,3138	0,3579
0,6	0,5693	0,338	0,4943	0,4981	0,3466	0,3892

SC (p.u)	Nilai CCT tiap titik gangguan (s)					
	Titik A	Titik B	Titik D	Titik E	Titik F	Titik G
0,7	0,6241	0,3668	0,5385	0,5456	0,3762	0,4265
0,8	0,7143	0,3994	0,6059	0,6047	0,4115	0,4717
0,9	0,836	0,4418	0,6818	0,6799	0,455	0,5284
1,0	1,0547	0,4953	0,776	0,7778	0,5103	0,2521

Dari data tabel 4.12 menunjukkan kenaikan nilai CCT berbanding lurus dengan penambahan kapasitas super kapasitor. Dengan hasil ini pengoptimalan nilai super kapasitor tidak bisa dilakukan dengan hanya acuan kenaikan nilai CCT tiap titik gangguan pada sistem karena jika acuan nilai optimal super kapasitor hanya pada nilai CCT paling yang besar maka dengan menambahkan nilai super kapasitor terus menerus nilai CCT akan terus naik juga. Maka dari itu pengoptimalan kapasitas super kapasitor dilakukan dengan mempertimbangkan waktu operasi sistem proteksi bekerja .

Waktu operasi proteksi sudah dijelaskan pada tabel 2.1 yaitu dengan total operasi rele pengaman dan *circuit breaker* adalah 0,2 s [4]. Dengan asumsi rele di *setting* pada 0,02 s maka total pemutusan saluran adalah 0,22 s. Dalam penentuan nilai optimal super kapasitor ini digunakan 2 kasus dalam operasi sistem proteksi yang bekerja, yaitu proteksi waktu primer dengan *setting* rele sebesar 0,02 s dan waktu primer dengan *setting* rele sebesar 0,1 s.

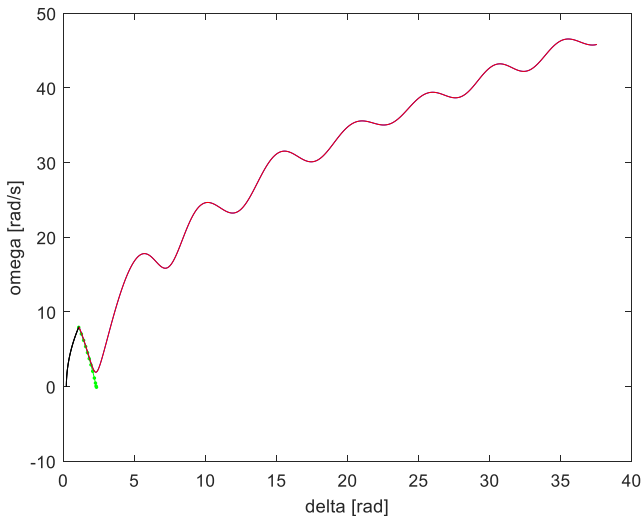
Gambar 4.10 menunjukkan nilai CCT di tiap titik gangguan yang meningkat seiring dengan meningkatnya super kapasitor. Sumbu y menyatakan nilai CCT dalam detik dan sumbu x menyatakan nilai super kapasitor yang dipasang pada sistem dalam p.u. Waktu operasi sistem proteksi (*t-clearing*) ditunjukkan dengan garis merah horizontal putus-putus.



Gambar 4.10 Grafik nilai CCT di tiap titik gangguan saat penambahan super kapasitor

4.4.1 Kasus Pemutusan gangguan pada T-Clearing 1

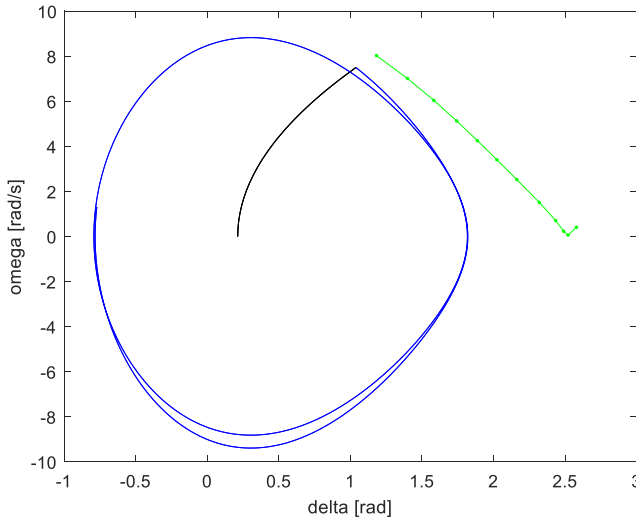
Pada kasus pertama yaitu *t-clearing* 1 diasumsikan bahwa waktu operasi sistem proteksi yang bekerja adalah proteksi primer dengan rele di *setting* 0,02 s jadi pemutusan gangguan *t-clearing* 1 terjadi saat 0,22 s. Dari gambar 4.10 terlihat bahwa pada sistem sebelum penambahan super kapasitor masih terdapat nilai CCT dibawah waktu operasi sistem proteksi yaitu pada gangguan di titik B dengan nilai CCT 0,2178 s. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak stabil dengan dibuktikan gambar 4.11



Gambar 4.11 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik B dengan *t-clearing* 1

Dari gambar 4.11 dapat dilihat kurva warna merah bahwa saat dilakukan pemutusan 0,22 detik kondisi rotor mengalami kenaikan percepatan seiring dengan bertambahnya pergeseran sudut rotor mengakibatkan kondisi yang tidak stabil karena generator kehilangan sinkronisasi (*Loss of Synchron*).

Setelah penambahan super kapasitor sebesar 0,1 pu, CCT sistem saat gangguan di titik B menjadi 0,2355 s dan hasil ini menunjukkan bahwa jika saat gangguan diputus dengan waktu 0,22 s sistem tetap stabil dengan dibuktikan pada gambar 4.12



Gambar 4.12 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik B dengan t -clearing 1 setelah penambahan super kapasitor 0,1 pu

Dari gambar 4.12 dapat dilihat kurva warna biru bahwa saat dilakukan pemutusan 0,22 detik kondisi lintasan rotor generator 2 beresilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) yang berarti generator masih dalam keadaan sinkron maka kondisi sistem masih stabil.

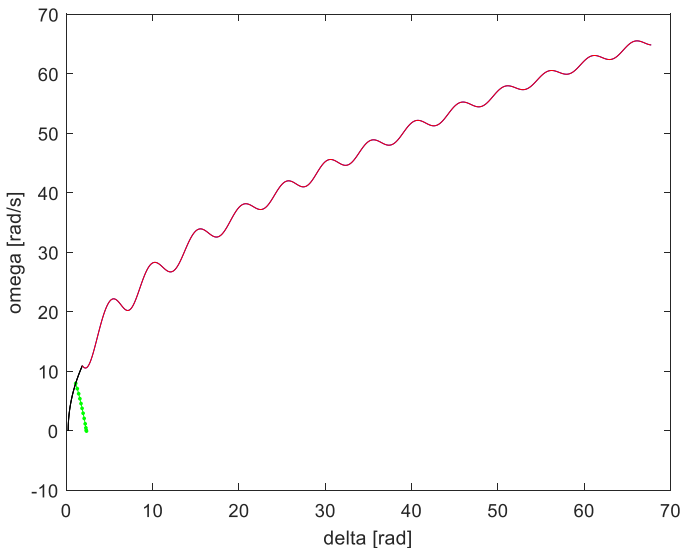
Tabel 4.13 menunjukkan nilai CCT di tiap titik gangguan pada sistem setelah dilakukan penambahan super kapasitor sebesar 0,1 pu

Tabel 4.13 Nilai CCT tiap titik gangguan setelah penambahan SC 0,1 pu

Titik Gang.	<i>Lossing synchronism</i> (s)	TDS (s)	<i>Error</i> (%)	<i>T-clr</i> (s)	Kondisi
A	0,3678	0,36-0,37	0	0,22	Stabil
B	0,2355	0,25-0,26	0	0,22	Stabil
C	0,2849	0,28-0,30	0	0,22	Stabil
D	0,3446	0,34-0,35	0	0,22	Stabil
E	0,3453	0,34-0,35	0	0,22	Stabil
F	0,2374	0,23-0,25	0	0,22	Stabil
G	0,2521	0,25-0,26	0	0,22	Stabil

4.4.2 Kasus Pemutusan gangguan pada T-Clearing 2

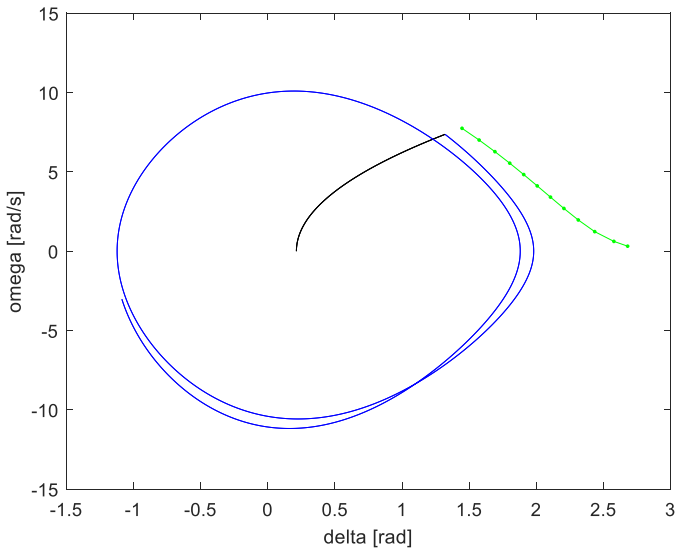
Untuk kasus kedua yaitu $t\text{-clearing}$ 2 sesuai gambar 4.10, diasumsikan bahwa waktu operasi sistem proteksi yang bekerja adalah proteksi primer dengan dengan rele di *setting* 0,1 s untuk rele *error* 0,12 s dan lama CB memutus saluran adalah 0,08 s. Jadi total waktu pemutusan $t\text{-clearing}$ 2 adalah 0,3 s. Gambar 4.10 menunjukkan bahwa sebelum penambahan super kapasitor, gangguan di titik B, F, G yang memiliki nilai CCT di bawah waktu operasi sistem proteksi. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tidak stabil apabila terjadi gangguan 3 fasa di titik B atau F maupun G dengan dibuktikan gambar 4.13



Gambar 4.13 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik B dengan $t\text{-clearing}$ 2

Dari gambar 4.13 dapat dilihat kurva warna merah bahwa saat dilakukan pemutusan 0,3 detik kondisi lintasan kritis rotor generator 2 mengalami kenaikan percepatan seiring dengan bertambahnya pergeseran sudut rotor mengakibatkan kondisi yang tidak stabil karena generator kehilangan sinkronisasi (*Loss of Synchron*).

Untuk kasus kedua ini yaitu dimana sistem proteksi dipilih *t-clearing* 2, dengan melihat gambar 4.10 maka kapasitas super kapasitor optimal yang dipasang adalah sebesar 0,5 pu. Setelah penambahan super kapasitor sebesar 0,5 pu, CCT sistem terkecil yaitu saat gangguan di titik B menjadi 0,3122 s dan hasil ini menunjukkan bahwa jika saat gangguan diputus dengan waktu 0,3 s sistem tetap stabil dengan dibuktikan pada gambar 4.14



Gambar 4.14 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω/s) terhadap sudut rotor (δ) generator 2 saat terjadi gangguan 3 fasa di titik B dengan *t-clearing* 2 setelah penambahan super kapasitor 0,5 pu

Dari gambar 4.14 dapat dilihat kurva warna biru bahwa saat dilakukan pemutusan 0,3 detik kondisi lintasan kritis rotor generator 2 beresilasi pada titik SEP (*Stable Equilibrium Point*) yang berarti generator masih dalam keadaan sinkron maka kondisi sistem masih stabil.

Tabel 4.14 menunjukkan nilai CCT di tiap titik gangguan pada sistem setelah dilakukan penambahan super kapasitor sebesar 0,5 pu. Pada titik gangguan C nilai CCT yang dihasilkan oleh metode *critical trajectory* mengalami *error* sebesar 15% dibandingkan metode TDS.

Maka dari itu data CCT dari metode TDS yang digunakan sebagai acuan kondisi stabil atau tidak stabil sistem.

Tabel 4.14 Nilai CCT tiap titik gangguan setelah penambahan SC 0,5 pu

Titik Gang.	<i>Lossing synchronism</i> (s)	TDS (s)	<i>Error</i> (%)	T- <i>clr</i> (s)	Kondisi
A	0,5151	0,51-0,52	0	0,3	Stabil
B	0,3122	0,31-0,32	0	0,3	Stabil
C	0,5200	0,44-0,45	15	0,3	Stabil
D	0,4560	0,45-0,46	0	0,3	Stabil
E	0,4549	0,45-0,46	0	0,3	Stabil
F	0,3138	0,32-0,33	0	0,3	Stabil
G	0,3312	0,33-0,34	0	0,3	Stabil

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

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

1. Perhitungan CCT dengan metode Critical Trajectory dengan *end point* hilangnya sinkronisasi (*Losing Synchronism*) menunjukkan hasil yang akurat jika dibandingkan dengan metode *numerical simulation* atau *Time Domain Simulation* (TDS). Hal ini didasarkan pada hasil simulasi tidak terdapat *error* (0%) pada sistem 3 generator 9 bus sebelum penambahan super kapasitor.
2. Pemasangan Super kapasitor pada sistem 3 generator 9 bus dapat meningkatkan nilai *Critical clearing time* (CCT), sehingga dapat meningkatkan kestabilan sistem tenaga listrik. Nilai CCT yang lebih besar ini dikarenakan super kapasitor mampu meredam osilasi yang timbul karena kejadian hubung singkat 3 fasa
3. Nilai Optimal super kapasitor yang dipasang di bus generator 2 sistem untuk menambah nilai CCT berdasarkan dengan waktu operasi sistem proteksi kasus pertama yaitu 0,22 s (*T-clearing 1*) adalah 0,1 pu sedangkan pada kasus kedua yaitu 0,3 s (*T-clearing 2*) adalah 0,5 pu.

5.2 Saran

Terdapat beberapa saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut :

1. Menerapkan metode perhitungan CCT secara langsung dengan sistem *real* untuk menguji keefektifan metode lebih lanjut.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk pemodelan super kapasitor sebagai peningkat kestabilan transien sistem.
3. Perlu dilakukan penelitian untuk pemodelan konverter dan karakteristik super kapasitor berkapasitas besar.

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

Daftar Pustaka

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, "Definition and Classification of Power System Stability", IEEE Transactions on Power system , vol. 19, no. 2, may 2004.
- [2] J.J. Grainger, W.D. Stevenson, "Power System Analysis", McGraw-Hill, 1994.
- [3] P. Kundur," Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1994
- [4] IEEE, "Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems", IEEE Std 242-2001, Oct 2001.
- [5] H. D. Chiang, C. C. Chu, and G. Cauley, "Direct stability analysis of electric power systems using energy functions: Theory, applications, and perspective," Proc. IEEE, vol. 83, no. 11, pp. 1497–1529, Nov. 1995
- [6] A. Priyadi, M. Hery, N. Yurino, M. pujiantara, T. Puspita , "Losing Synchronism Technique based on Critical Trajectory Method for Obtaining The CCT with Installing SCES" ISITIA Conference, 2018.
- [7] Saadat, Hadi, "Power System Analysis 2nd Edition", McGraw Hill, Boston, 2004.
- [8] H. Hashim, M. R. Zulkepali, Y. Omar, "An Analysis of Transient Stability Using Center-of-Inertia: Angle and Speed", IEEE International Conf, Dec 2010.
- [9] N. Yorino, A. Priyadi, Hironori K., dan M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [10] Anderson, P. M. dan A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", United States: A John Wiley & Sons, Inc, 2003.
- [11] D. Z. Ariadana," Optimasi CES menggunakan Differential Evolution Algorithm untuk kestabilan transien multimesin berdasarkan fungsi energi", Tugas Akhir Elektro ITS, Juni 2014.

~ Halaman ini sengaja dikosongkan ~

BIODATA PENULIS



Arief Riambodo, dilahirkan di Klaten pada 12 Januari 1998. Merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Bapak Joko Heryanto dan Ibu Wahyuningsih. Masa kecil hingga jenjang SMA penulis habiskan di kota kecil yaitu klaten, Jawa Tengah. Penulis mengawali pendidikan dasar di SDN 2 Kupang, kemudian melanjutkan SMPN 1 Delanggu, dan melanjutkan pendidikan jenjang sekolah terakhir di SMAN 1 Klaten. Setelah lulus SMA pada tahun 2015, penulis melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan Departemen Teknik Elektro bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Selain kegiatan perkuliahan, penulis aktif sebagai asisten di Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST). Penulis juga aktif baik dalam organisasi Himpunan di lingkup departemen maupun lingkup institut. Penulis pernah tergabung dalam Tim Bayucaraka ITS pada divisi *Racing Plane* dan pernah menjuarai KRTI tahun 2017. Penulis juga aktif di kegiatan luar lingkup kampus yaitu dalam organisasi pecinta alam. Penulis dapat dihubungi melalui email ariefriam12@gmail.com