

TUGAS AKHIR - EE 184801

PENENTUAN KAPASITAS OPTIMAL SUPERKAPASITOR UNTUK MEMPERBAIKI CRITICAL CLEARING TIME (CCT) MENGGUNAKAN METODE MODIFIKASI LOSING SYNCHRONISM

Rakaditra Astungkara NRP 07111540000027

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

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



TUGAS AKHIR - EE 184801

PENENTUAN KAPASITAS OPTIMAL SUPERKAPASITOR UNTUK MEMPERBAIKI CRITICAL CLEARING TIME (CCT) MENGGUNAKAN METODE MODIFIKASI LOSING SYNCHRONISM

Rakaditra Astungkara NRP 07111540000027

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

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



FINAL PROJECT - EE 184801

SUPERCAPASITOR OPTIMAL SIZING TO IMPROVE CRITICAL CLEARING TIME USING MODIFIED LOSING SYNCHRONISM METHOD

Rakaditra Astungkara NRP 07111540000027

Supervisors Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

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

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya judul **"PENENTUAN** KAPASITAS **OPTIMAL** dengan SUPERKAPASITOR CRITICAL UNTUK MEMPERBAIKI CLEARING TIME (CCT) MENGGUNAKAN METODE MODIFIKASI LOSING SYNCHRONISM" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, Juni 2019

Rakaditra Astungkara 07111540000027

PENENTUAN KAPASITAS OPTIMAL SUPERKAPASITOR UNTUK MEMPERBAIKI CRITICAL CLEARING TIME (CCT) MENGGUNAKAN METODE MODIFIKASI LOSING SYNCHRONISM

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

Dosen Pembimbing II

2/7/19

Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. NIP. 197309271998031004 Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D. NIP. 198208292006042001

JUNI, 2019



PENENTUAN KAPASITAS OPTIMAL SUPERKAPASITOR UNTUK MEMPERBAIKI CRITICAL CLEARING TIME (CCT) MENGGUNAKAN METODE MODIFIKASI LOSING SYNCHRONISM

Nama Mahasiswa : Rakaditra Astungkara Dosen Pembimbing I : Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng. Dosen Pembimbing II : Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D. Abstrak:

Keandalan dan kontinuitas merupakan aspek penting pada suatu sistem kelistrikan. Ketersediaan suplai listrik dan sistem yang terinterkoneksi merupakan salah satu penunjang, namun hal ini menyebabkan kestabilan pada sistem menjadi semakin rumit sehingga kestabilan transien menjadi hal utama yang diperhitungkan. Gangguan pada sistem seperti arus hubung singkat tiga fasa dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil dan generator kehilangan sinkron, oleh karena itu Critical Clearing Time (CCT) harus diperhitungkan untuk menjaga sistem tetap stabil. CCT merupakan waktu maksimum gangguan dapat ditoleransi. Sistem proteksi yang beroperasi setelah batas nilai CCT dapat menyebabkan gangguan lain pada sistem. CCT diperoleh menggunakan metode critical trajectory. Untuk memperbaiki nilai CCT pada sistem, maka perlu ditambahkan Super Capacitor Energy Storage (SCES). SCES dapat menyimpan dan mensuplai listrik dalam jumlah besar secara simultan sehingga dapat menjadi solusi untuk memperbaiki nilai CCT. Penentuan kapasitas optimum dari SCES yang akan dipasang pada sistem menjadi hal penting dikarenakan harga dari SCES yang mahal. Pada tugas akhir ini, optimasi nilai superkapasitor akan diperoleh menggunakan metode critical trajectory berbasis modifikasi losing synchronism. Nilai CCT akan berbanding lurus dengan penambahan SCES, sehingga perlu ditambahkan batasan yaitu setting proteksi sehingga dapat diketahui kapasitas optimal dari SCES.

Kata kunci: kestabilan transien, critical clearing time, supercapasitor energy storage, critical trajectory

SUPERCAPASITOR OPTIMAL SIZING TO IMPROVE CRITICAL CLEARING TIME USING MODIFIED LOSING SYNCHRONISM METHOD

Student Name	: Rakaditra Astungkara
Supervisor I	: Dr. Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng.
Supervisor II	: Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.

Abstract:

Reliability and continuity are important aspects of an electrical system. Improving the electricity supply and interconnected the system are the main supports, but this condition causes stability in the system more complex, so transient stability analysis becomes the main thing. Interference in systems such as three-phase short-circuit can cause the system to become unstable and the generator losing its synchronism, therefore it is important to consider critical clearing time (CCT). CCT is the maximum time that can be tolerated to keep the system stable. Protection systems that operated after the CCT value can cause other disruptions to the system. To improve the CCT value to the system, Super Capacitor Energy Storage (SCES) is needed. SCES can store and supply large amounts of electricity simultaneously so that it can be a solution to improve CCT values. Determining the optimal capacity of SCES to be installed on the system is important for the price of expensive SCES. In this final project, optimization of the value of supercapacitors will be obtained using a critical path method based on modified losing synchronism. The CCT value will be directly proportional to the addition of SCES, so protection setting is a constrain for the case, than the optimal capacity of SCES can be known.

Key Word: *transient stability, critical clearing time, critical trajectory, supercapasitor energy storage*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas limpahan kasih-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas **"PENENTUAN** akhir judul KAPASITAS **OPTIMAL** SUPERKAPASITOR UNTUK MEMPERBAIKI CRITICAL CLEARING TIME MENGGUNAKAN (CCT) METODE MODIFIKASI LOSING SYNCHRONISM". Selain sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi Teknik Sistem Tenaga, S1 Teknik Elektro ITS, tugas akhir ini merupakan bagian dari penelitian terhadap pengaruh suatu energy storage yaitu superkapasitor terhadap kestabilan suatu sistem tenaga listrik.

Atas terselesaikannya tugas akhir ini, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

- 1. Orang tua tercinta, Bapak Sapta Putra Pemut Adi dan Ibu Diah Widiastuti, serta kakak, Ajeng Sista Anindya Widyastara yang selalu memberikan dukungan, dan doa untuk keberhasilan penulis.
- 2. Bapak Ardyono Priyadi dan Ibu Vita Lystianingrum selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan arahan, ilmu, saran, serta motivasi kepada penulis.
- 3. Tim topik transien yaitu Arief Riambodo, Almira Atha, Aprilia Rahmayanti yang telah berjuang bersama menyelesaikan tugas akhir dengan penuh keseruan.
- 4. Mbak Talitha Puspita Sari yang mengarahkan serta membimbing kami berempat hingga selesainya tugas akhir dan mas Raki yang membagikan ilmu serta pengalamannya.
- 5. Shinta Atriafinesa atas kesabaran, perhatian dan motivasi untuk penulis menyelesaikan masa perkuliahan
- Seluruh asisten LIPIST juga divisi malam yang senantiasa menghadirkan cerita-cerita menarik dalam keseharian penulis menempuh semester akhir.
- 7. Tim proyek yang telah berjuang bersama mengerjakan proyek dan tugas akhir secara bersamaan.
- 8. Keluarga MSDM dimasa lampau dan saat ini, terutama Yeni, Fachrul, Risna dan Tanto yang menemani penulis selama aktif di himpunan baik dalam suka maupun duka.
- 9. Rekan-rekan e55 yang telah berjuang bersama menempuh perkuliahan dan menjadi keluarga pertama penulis dimasa perkuliahan.

Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Juni 2019

Rakaditra Astungkara

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN i			
ABSTRA	Kv		
KATA PENGANTARix			
DAFTAR ISI xi			
DAFTAR			
BAB 1 PH	ENDAHULUAN		
1.1	Latar Belakang		
1.2	Permasalahan1		
1.3	Tujuan2		
1.4	Batasan Masalah2		
1.5	Metodologi		
1.6	Sistematika Penulisan		
1.7	Relevansi4		
BAB 2 K	AJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI5		
2.1	Kajian Pustaka5		
2.2	Stabilitas Sistem		
2.3	Klasifikasi Stabilitas7		
2.3.	Kestabilan Sudut Rotor7		
2.3.2	2 Kestabilan Frekuensi		
2.3.3	3 Kestabilan Tegangan 8		
2.4	Kestabilan Transien		
2.4.	Perubahan Beban 10		
2.5	Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan11		
2.6	Gangguan Hubung Singkat13		
2.7	Critical Clearing Time		
2.8	Critical Trajectory15		
2.9	Supercapasitor Energy Storage17		

CCT sebagai Pertimbangan Koordinasi Proteksi 1		
BAB 3 METODE PERHITUNGAN		
1 Diagram Alur		
Parameter Modifikasi Sistem 4 Mesin Anderson dan Fouad 2		
3.3 Analisis Aliran Daya		
1 Metode Newton-Raphson	23	
2 Matriks Jacobian	25	
Reduksi Matriks	26	
Pemodelan Sistem	27	
Metode Runge-Kutta Orde Empat	29	
Metode Critical Trajectory	30	
1 Metode Modifikasi Trapezoidal	30	
2 Modifikasi Losing Synchronism	32	
Penambahan Supercapasitor Energy Storage	32	
ASIL DAN PEMBAHASAN	35	
Analisis CCT tanpa SCES	35	
Analisis nilai CCT akibat Gangguan tiga fasa ke tanah.	35	
2 Analisis Grafik	36	
Analisis Penambahan SCES pada Sistem	39	
l Analisis Pada Titik Gangguan A	40	
2 Analisis Pada Titik Gangguan B	41	
3 Analisis Pada Titik Gangguan C	43	
4 Analisis Pada Titik Gangguan D	45	
5 Analisis Pada Titik Gangguan E	47	
Optimasi Kapasitas SCES pada Sistem	49	
Penentuan Kapasitas SCES Kondisi Pertama	50	
2 Penentuan Kapasitas SCES Kondisi Kedua	51	
BAB 5 KESIMPULAN		
	CCT sebagai Pertimbangan Koordinasi Proteksi ETODE PERHITUNGAN Diagram Alur Parameter Modifikasi Sistem 4 Mesin Anderson dan Fouad Analisis Aliran Daya Metode Newton-Raphson Reduksi Matriks Pemodelan Sistem Metode Runge-Kutta Orde Empat Metode Runge-Kutta Orde Empat Metode Critical Trajectory Metode Critical Trajectory Metode Modifikasi Trapezoidal Metode Modifikasi Trapezoidal Metode Modifikasi Trapezoidal Metode Modifikasi Trapezoidal Metode Modifikasi Cong Synchronism Penambahan Supercapasitor Energy Storage ASIL DAN PEMBAHASAN Analisis CCT tanpa SCES ASIL DAN PEMBAHASAN Analisis rilai CCT akibat Gangguan tiga fasa ke tanah Analisis Penambahan SCES pada Sistem Analisis Penambahan SCES pada Sistem Analisis Pada Titik Gangguan B Analisis Pada Titik Gangguan C Analisis Pada Titik Gangguan D Analisis Pada Titik Gangguan E Optimasi Kapasitas SCES kondisi Pertama Penentuan Kapasitas SCES Kondisi Pertama SIMPULAN	

5.1	Kesimpulan	53
5.2	Saran	53
DAFTAR	PUSTAKA	55
LAMPIR	AN	57
BIODAT	A PENULIS	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga7
Gambar 2.2 Respon sudut rotor terhadap waktu saat gangguan
Gambar 2.3 Kurva Daya - Sudut Rotor 11
Gambar 2.4 Gangguan 3 fasa ke tanah 14
Gambar 2.5 Critical Trajectory tanpa damping 15
Gambar 3.1 Diagram alur pengerjaan metode critical trajectory19
Gambar 3.2 Diagram alur pengerjaan metode critical trajectory dengan
penambahan SCES20
Gambar 3.3 Single Line Diagram Modifikasi 4 Mesin Anderson dan
Fouad
Gambar 3.4 Ilustrasi Metode Newton-raphson25
Gambar 3.5 Pemodelan Generator
Gambar 3.6 Modifikasi trapezoidal 31
Gambar 4.1 Respon ω terhadap δ di titik gangguan A
Gambar 4.2 Respon ω terhadap δ di titik gangguan B
Gambar 4.3 Respon ω terhadap δ di titik gangguan C
Gambar 4.4 Respon ω terhadap δ di titik gangguan D
Gambar 4.5 Respon ω terhadap δ di titik gangguan E
Gambar 4.6 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,2 pu
Gambar 4.7 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan \triangle CCT
sistem di titik gangguan A 41
Gambar 4.8 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,3 pu
Gambar 4.9 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan \triangle CCT
sistem di titik gangguan B 43
Gambar 4.10 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,5 pu
Gambar 4.11 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan \triangle CCT
sistem di titik gangguan C 45
Gambar 4.12 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,7 pu
Gambar 4.13 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan Δ CCT
sistem di titik gangguan D 47
Gambar 4.14 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,9 pu
Gambar 4.15 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan \triangle CCT
di titik gangguan E
Gambar 4.16 Grafik kapasitas optimal SCES dengan $t_{clearing}$ 0,24 detik.
51
Gambar 4.17 Grafik kapasitas optimal SCES dengan $t_{clearing}$ 0,28 detik.

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Clearing Time Inteval
Tabel 3.1 Data Saluran Sistem Modifikasi 4 Mesin Anderson dan Fouad
Tabel 3.2 Data tegangan, daya serta beban tiap bus. 22
Tabel 3.3 Data Daya Mekanis (Pm) 23
Tabel 4.1 Nilai CCT tiap titik gangguan tanpa SCES 35
Tabel 4.2 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik A
Tabel 4.3 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik B 42
Tabel 4.4 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titikC 44
Tabel 4.5 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik D
Tabel 4.6 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik E
Tabel 4.7 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT tiap titik gangguan 49

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kestabilan merupakan salah satu faktor utama dalam suatu sistem tenaga listrik. Kestabilan sistem adalah kemampuan sistem menjaga kondisi operasi yang seimbang dan mampu kembali ke keadaan awal sistem ketika terjadi gangguan. Gangguan sering terjadi pada sistem kelistrikan yang terinterkoneksi, sehingga diperlukan koordinasi proteksi yang sesuai dengan kondisi sistem. Saat terjadi gangguan, rele pengaman mendeteksi gangguan kemudian memicu *Circuit Breaker* (CB) untuk memutus gangguan.

Analisis kestabilan transien erat hubungannya dengan gangguan hubung singkat, dimana yang terbesar adalah hubung singkat tiga fasa. Salah satu faktor yang harus dipertimbangkan dalam setting koordinasi proteksi adalah waktu pemutus kritis/*Critical Clearing Time* (CCT). CCT merupakan waktu kritis pemutusan yang diperbolehkan untuk memutus gangguan. Sistem menjadi tidak stabil ketika gangguan diputus melebihi nilai CCT. Untuk mencari nilai CCT, salah satu metode yang digunakan adalah *critical trajectory*. *Critical trajectory* merupakan suatu lintasan yang berawal dari titik gangguan dan berakhir pada titik kritis.

Untuk memperbaiki nilai CCT, kita dapat menambahkan *Super Capasitor Energy Storage* (SCES) pada sistem multi mesin. SCES dapat menyimpan dan mensuplai listrik dalam jumlah besar secara cepat, sehingga pengaman pada sistem memiliki waktu lebih panjang untuk memutus gangguan dan mampu menjaga kestabilan. Kapasitas dari SCES harus optimal karena harga dan biaya pemasangan yang mahal. Dalam tugas akhir ini, digunakan metode modifikasi *losing synchronism*, yaitu sebuah metode langsung untuk mendapatkan nilai CCT sehingga dapat dilakukan analisis kestabilan transien dengan adanya penambahan SCES pada bus generator sistem multimesin.

1.2 Permasalahan

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

- a) Bagaimana mendapatkan nilai CCT dengan metode *critical trajectory* berbasis modifikasi *losing synchronism*?
- b) Bagaimana pengaruh penambahan *super capasitor energy storage* di bus generator terhadap nilai CCT dan kestabilan transien sistem?

c) Bagaimana cara memperoleh kapasitas optimal *supercapasitor energy storage* untuk mendapatkan nilai CCT terbesar?

1.3 Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini diharapkan sebagai berikut :

- a) Memperoleh nilai CCT berdasarkan metode *critical trajectory* berbasis modifikasi *losing synchronism*.
- b) Mengetahui pengaruh penambahan *supercapasitor energy storage* terhadap nilai CCT dan kestabilan transien sistem.
- c) Memperoleh kapasitas optimal *supercapasitor energy storage* untuk memperbaiki nilai CCT.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada topik tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

- a) Analisis metode menggunakan modifikasi sistem 4 Mesin Anderson dan Fouad.
- b) Pemodelan SCES dalam bentuk matematis, permasalahan kontrol SCES diabaikan.
- c) Optimalisasi SCES tanpa mempertimbangkan karakteristik, rating dan harga di pasaran.
- d) Simulasi menggunakan program Matlab 2016b.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah:

a) Studi Literatur

Mempelajari literasi dan referensi berupa jurnal, paper, dan bukubuku terkait analisis kestabilan transien, metode penentuan CCT dengan *critical trajectory* berbasis modifikasi *losing synchronism*.

- b) Pengumpulan Data dan Pemodelan Sistem Melakukan pengumpulan data - data penunjang Tugas Akhir ini, berupa parameter data saluran, kapasitas generator, tegangan bus melalui jurnal dan paper IEEE serta penelitian yang berhubungan dengan sistem multi mesin IEEE menggunakan program Matlab.
- c) Simulasi

Mensimulasikan dari hasil pemodelan yang telah dirancang dengan metode *critical trajectory* berbasis modifikasi *losing synchronism* untuk memperoleh kapasitas optimal SCES.

d) Analisis Hasil Simulasi

Hasil simulasi berupa nilai CCT awal menggunakan nilai *critical trajectory*, kemudian dari nilai CCT awal tersebut dicari nilai optimal kapasitas SCES dan diperoleh nilai CCT baru.

e) Kesimpulan

Dari hasil simulasi, dapat ditarik kesimpulan mengenai pengaruh pemasangan SCES terhadap nilai CCT dan dapat ditentukan kapasitas optimal SCES untuk memperbaiki nilai CCT sistem sehingga dapat digunakan untuk pertimbangan koordinasi proteksi dan sebagai referensi penelitian berikutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

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

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika pembahasan, dan relevansi.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.

Bab 3 : Pemodelan Sistem

Bab ini membahas mengenai pemodelan sistem, perhitungan serta penjabaran mengenai metode yang digunakan untuk simulasi

- Bab 4 : Simulasi dan Analisis Bab ini membahas simulasi dari pemodelan sistem yang telah dirancang untuk menentukan nilai CCT yang akan dianalisis. Analisis beradasarkan nilai CCT yang diperoleh dari efek penambahan SCES dibeberapa titik gangguan.
- Bab 5 : Penutup Bab ini berisi tentang kesimpulan hasil tugas akhir yang telah dikerjaan dan juga saran yang dapat diberikan untuk pengembangan hasil tugas akhir ini kedepannya.

1.7 Relevansi

Hasil dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

- a) Mengetahui pengaruh penambahan SCES terhadap nilai CCT pada sistem tenaga listrik.
- b) Sebagai bahan pertimbangan untuk studi koordinasi proteksi.
- c) Sebagai bahan referensi penelitian selanjutnya mengenai pemasangan *super capasitor energy storage* ke dalam sistem.
- d) Dapat digunakan sebagai referensi pada penelitian serupa ataupun penelitian pengembangan mengenai pengaruh stabilitas transien dalam sistem kelisrikan transmisi maupun industri.

BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini akan membahas mengenai penelitian yang sudah ada dan teori-teori yang berkaitan dengan topik optimasi dari *energy storage* untuk memperbaiki nilai CCT. Secara garis besar bab ini terdiri dari kajian pustaka yang akan dijelaskan pada sub-bab 2.1, sedangkan dasar teori yang berkaitan dengan tugas akhir akan dijelaskan pada sub-bab 2.2 sampai 2.10.

2.1 Kajian Pustaka

Sub-bab ini akan membahas mengenai kajian pustaka berkaitan dengan hasil penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Penelitian yang sudah ada berkaitan dengan optimasi nilai superkapasitor untuk memperbaiki nilai CCT. Kajian pustaka berfokus pada beberapa aspek, antara lain metode pengujian dan analisis dari hasil pengujian.

Penelitian pertama yang menjadi acuan adalah buku tugas akhir milik Debit Zein Ariandana, yang membahas mengenai optimasi *capacitive energy storage* (CES) dengan metode fungsi energi untuk kestabilan transien [1]. Pada buku tersebut menjelaskan bahwa CES dapat meningkatkan nilai CCT, dengan cara melakukan optimasi pada salah satu parameter dari pemodelan diagram blok CES. Optimasi parameter menggunakan *differential evolution algorithm* (DEA) sehingga diperoleh nilai CES yang tepat sedangkan nilai CCT diperoleh menggunakan metode *controlling unstable equilibrium point* (CUEP), dari analisis CUEP dapat diketahui kondisi energi pada system saat terjadi gangguan.

Penelitian kedua adalah *paper* milik Talitha Puspita Sari yang membahas mengenai efek pemasangan *supercapasitor energy storage* (SCES) terhadap nilai CCT [2]. Nilai CCT diperoleh dengan metode *critical* trajectory, sedangkan nilai SCES ditetapkan adalah 0,1 pu. Dari kedua penelitian ini lebih berfokus pada efek penambahan suatu parameter *energy storage* terhadap nilai CCT dengan menggunakan metode yang berbeda, belum dapat dipastikan apakah nilai CCT akan terus mengalami kenaikan ataupun mengalami saturasi. Kedua penelitian ini menjadi acuan penulis untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai efek pada nilai CCT sistem saat nilai SCES terus ditingkatkan.

2.2 Stabilitas Sistem

Kestabilan sistem tenaga listrik merupakan kemampuan dari suatu sistem tenaga listrik kembali ke kondisi operasi awal atau mendapatkan keadaan operasi seimbang setelah mengalami gangguan, sehingga kesatuan daripada sistem tetap terjaga. Definisi dari kesatuan sistem adalah kondisi dimana sistem tenaga listrik tidak mengalami peristiwa generator atau beban trip, kecuali untuk keperluan isolasi dan pemeliharaan peralatan [3]. Penjelasan ini berlaku untuk sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi antara satu generator dengan generator lainnya, dimana satu generator menjadi referensi sistem. Salah satu parameter sistem kelistrikan dapat dikatakan baik adalah mampu mengalirkan daya sesuai kebutuhan secara kontinu. Hal ini disebabkan adanya perubahan beban tiap detik. Pasokan daya dari generator harus disesuaikan dengan variasi kebutuhan beban sehingga kontinuitas operasi sistem tenaga listrik terjaga. Selain itu, kualitas output yang dihasilkan memenuhi standar untuk menjaga keberlangsungan operasi [4]. Namun, keberlangsungan operasi sistem tenaga listrik tidak dapat terhindar dari gangguan, baik gangguan dalam jangka pendek maupun jangka panjang dengan skala kecil maupun besar. Gangguan kecil dapat disebabkan oleh adanya perubahan beban secara kontinu, sedangkan gangguan besar dapat disebabkan oleh gangguan hubung singkat. Gangguan yang tidak segera dihilangkan dapat menyebabkan pemutusan pada saluran yang terkena gangguan, sehingga generator kehilangan titik kestabilan.

Sistem dikatakan beroperasi stabil jika keluaran daya elektris dari pembangkit yang sinkron, seimbang dengan daya input mekanis sehingga sistem tetap sinkron. Adanya gangguan dapat menyebabkan nilai daya elektris dan daya mekanis menjadi tidak seimbang sesaat dikarenakan generator mengalami percepatan atau perlambatan pada putaran rotor. Hal ini menyebabkan pergeseran sudut rotor sehingga generator pada sistem interkoneksi tidak sinkron. Pada periode transien, sistem stabil jika respon osilasi yang mengikuti gangguan dapat teredam, jika tidak maka sistem kehilangan kestabilan. Ada beberapa cara untuk menjaga kestabilan sistem saat terjadi gangguan, antara lain pemasangan automatic voltage regulator (AVR) untuk mengatur governor. Selain itu iuga dapat memanfaatkan *energy* storage untuk seolah-olah menggantikan beban yang hilang akibat gangguan, salah satunya adalah superkapasitor.

2.3 Klasifikasi Stabilitas

Pengklasifikasian stabilitas sistem tenaga listrik harus berdasarkan pada pertimbangan berikut [5]:

- 1. Sifat alami yang dihasilkan dari ketidakstabilan, seperti yang ditunjukkan oleh variabel sistem utama dimana ketidakstabilan dapat diamati.
- 2. Besarnya gangguan yang dipertimbangkan, dimana mempengaruhi perhitungan dan prediksi dari stabilitas.
- 3. Perangkat, proses dan rentang waktu yang dipertimbangkan untuk menilai stabilitas

Berdasarkan pertimbangan diatas, kestabilan pada sistem tenaga dikategorikan menjadi tiga, yaitu :

- 1. Kestabilan sudut rotor
- 2. Kestabilan frekuensi
- 3. Kestabilan tegangan



Gambar 2.1 Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

2.3.1 Kestabilan Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan mesin sinkron yang terintekoneksi untuk mempertahankan kondisi sinkron setelah mengalami gangguan. Pada operasi normal mesin sinkron, medan putar rotor dan medan putar stator berotasi dengan kecepatan sama. Torsi input mekanis dan torsi output elektris akan bernilai sama atau disebut dengan *equilibrium condition*, jika kesetimbangan terganggu maka akan menyebabkan percepatan atau perlambatan pada rotor mesin tersebut [5].

Percepatan atau perlambatan tersebut menimbulkan perbedaan sudut atau yang disebut sudut rotor dan mengakibatkan lepasnya sinkronisasi generator pada sistem kelistrikan. Kestabilan sudut rotor diklasifikasikan menjadi dua [4], yaitu :

- a. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil
- b. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar atau kestabilan transien

Kestabilan sudut rotor akibat gangguan kecil sebagai contoh berasal dari perubahan beban-beban kecil, terputusnya saluran, kurangnya torsi sinkronisasi dan torsi *damping*. Kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar berasal dari adanya gangguan hubung singkat dan lepasnya generator.

2.3.2 Kestabilan Frekuensi

Kestabilan frekuensi merupakan kemampuan sistem tenaga mempertahankan frekuensi awal sistem ketika terjadi gangguan [5]. Gangguan yang terjadi biasanya akibat perubahan pembangkit atau beban yang signifikan.

Kestabilan frekuensi diklasifikasikan menjadi dua, yaitu jangka panjang dan jangka pendek. Kestabilan frekuensi jangka panjang disebabkan oleh kontrol *governor* yang kurang responsif saat terjadi gangguan, sedangkan kestabilan frekuensi jangka pendek akibat adanya perubahan beban ataupun *supply* yang signifikan. Batas frekuensi untuk sistem dianggap stabil adalah \pm 0,5 Hz.

2.3.3 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan erat hubungannya dengan beban. Ketidakstabilan tegangan dibagi menjadi dua kondisi, yaitu *overvoltage* dan *undervoltage*. Kondisi *overvoltage* diakibatkan oleh lepasnya beban pada bus gangguan, sedangkan kondisi undervoltage diakibatkan oleh lepasnya generator dari sistem atau bertambahnya beban pada bus gangguan. Kondisi yang diizinkan oleh PLN adalah $\pm 5\%$ untuk level tegangan 500kV dan $\pm 10\%$ untuk level tegangan dibawah 500kV.

2.4 Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem kelistrikan untuk mempertahankan sinkronisasi antar mesin ketika mengalami gangguan secara tiba-tiba dalam waktu satu ayunan pertama (*first swing*) ketika *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dan *governor* belum bekerja. Sistem dikatakan stabil jika berada dalam kondisi steady-state, namun kondisi ini belum tentu stabil ketika terjadi gangguan.

Pendasaran sistematis untuk klasifikasi kestabilan berdasarkan atas pertimbangan [6]:

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

Gambar 2.2 menunjukan karakteristik dari mesin sinkron berupa respon sudut rotor pada kasus kondisi stabil dan dua kasus kondisi tidak stabil.



Gambar 2.2 Respon sudut rotor terhadap waktu saat gangguan

- a) Kondisi 1, pada saat sistem tidak stabil, sudut rotor terus meningkat *steady* hingga menyebabkan hilangnya sinkronisasi. Bentuk dari ketidakstabilan ini dapat disebut dengan bentuk *first swing instability* atau ketidakstabilan ayunan pertama, yang dimana disebabkan oleh kurangnya torsi sinkronisasi.
- b) Kondisi 2, pada saat sistem stabil, sudut rotor sempat mengalami isolasi, yang awalnya sudut sempat meningkat hingga cukup tinggi, kemudian kembali menurun untuk mempertahankan sinkronisasinya, sampai menuju steady state. Hal ini menunjukan bahwa sistem mencapai *equilibrium condition*.
- c) Kondisi 3, pada kondisi awal sistem, tepatnya pada saat ayunan pertama sistem menunjukan stabil, akan tetapi sistem menjadi

tidak stabil, akibat dari semakin besarnya osilasi yang timbul pada saat mencapai kondisi akhir. Bentuk dari ketidakstabilan dapat dikategorikan *small-signal unstable* karena terjadi pada saat kondisi steady state, dan bukan disebabkan oleh gangguan transien melainkan gangguan dinamik.

Pada sistem besar, *first swing instability* tidak selalu menyebabkan ketidakstabilan transien, sehingga umumnya interval kurun waktu yang diamati dalam studi stabilitas transien biasanya 3-5 detik setelah gangguan, dan dapat juga diperpanjang 10-20 detik untuk sistem yang besar [4]. *Transient Stability Assesment* diperlukan untuk mencegah kerusakan meluas karena besarnya pengaruh pada sistem saat generator gagal mempertahankan sinkronisasinya.

2.4.1 Perubahan Beban

Salah satu penyebab ketidakstabilan pada sistem adalah perubahan beban, perubahan dapat berupa penambahan beban besar secara tiba - tiba dan lepasnya beban besar. Dari kedua kondisi tersebut muncul beberapa respon yang terjadi pada mesin sinkron generator sistem, karena stabilitas tidak lepas dari pembangkitan dan bebannya.

Pada kondisi pertama, yaitu adanya penambahan beban secara tiba – tiba, menyebabkan kinerja generator sistem yang digunakan meningkat. Hal ini disebabkan daya elektris P_e yang dikeluarkan oleh generator meningkat melebihi daya masukan mekanis generator P_m . Akibatnya kecepatan putar rotor generator melambat, frekuensi sistem turun dan sudut rotor bertambah. Jika daya masukan mekanis P_m mampu kembali mengimbangi perubahan daya elektris P_e , ayunan rotor kembali menurun, dan sistem mencapai steady. Namun pada kondisi sebaliknya, akan menyebabkan osilasi, rotor bergetar dan mengayun mencapai titik kritis dan bahkan bisa melebihi hingga lepas sinkronisasinya.

Kondisi lepasnya beban dapat disebabkan oleh gangguan hubung singkat. Gambar 2.3 menjelaskan kurva antara daya dengan sudut rotor ketika terjadi gangguan hubung singkat pada sistem.

- 1. Pada saat gangguan terjadi δ_0 , daya elektris P_e yang dikeluarkan oleh generator menurun, sehingga kondisinya daya mekanis P_m lebih besar dari daya elektris P_e .
- 2. Rotor mengalami percepatan, frekuensi sistem meningkat dan sudut rotor bertambah atau mengayun.
- 3. Daya mekanis P_m berusaha untuk mengikuti perubahan daya elektris P_e secepatnya dan gangguan tersebut harus segera dihilangkan

sebelum sudut rotor mencapai titik δ_m sehingga saat gangguan dihilangkan, kondisinya menjadi daya elektris P_e lebih besar dari daya mekanis P_m .

4. Generator mengusahakan untuk menyeimbangkan kedua daya tersebut dengan meningkatkan daya mekanis P_m guna mencapai *equilibrium condition*.



Gambar 2.3 Kurva Daya - Sudut Rotor

Sudut kritis (δ_c) dikonversi menjadi waktu kritis dimana gangguan harus dihilangkan agar sistem dapat mencapai kestabilan atau tidak kehilangan sinkron. Waktu kritis tersebut dinamakan *critical clearing time* (CCT) dimana nilai CCT merupakan batas waktu peralatan beroperasi untuk mengamankan gangguan.

2.5 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Pada kondisi normal mesin sinkron, arah putar antara axis rotor dengan resultan medan magnetik adalah searah. Kondisi tersebut dinamakan dengan persamaan ayunan. Persamaan ayunan merepresentasikan gerakan rotor mesin akibat pengaruh torsi inersia dari resultan daya mekanis dan torsi elektris di rotor [7] sehingga dapat dituliskan dalam,

$$j\theta = T_a \tag{2.1}$$

Dimana

J : momen inersia $(kg \cdot m2)$

- θ : sudut mekanis dari shaft (radian)
- T_a : torsi percepatan (N·m)

Putaran pada mesin sinkron menghasilkan torsi mekanis (Tm) dan torsi elektris (Te). Pada kondisi steady state, tidak ada perbedaan nilai antara torsi mekanis dan torsi elektris sehingga tidak ada percepatan atau,

$$Tm = Te \tag{2.2}$$

$$Ta = Tm - Te \tag{2.3}$$

Namun persamaan tersebut tidak berlaku ketika terjadi akselerasi (J) akibat adanya gangguan persamaan (2.1) menjadi,

$$J\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e = T_a \tag{2.4}$$

Apabila kedua sisi dikalikan dengan ω_m maka persamaan menjadi

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

$$M\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \tag{2.6}$$

Dimana

М	=	Konstanta inersia
δ_m	=	Sudut daya/sudut torsi mekanik (radian)
ω_m	=	Kecepatan sudut rotor (rad/s)
P_a	=	Daya akselerasi (watt)
P_m	=	Daya mekanis pada <i>input</i> generator (watt)
P_e	=	Daya elektris pada <i>output</i> generator (watt)

Konstanta inersia (M) pada aplikasinya tidak selalu bernilai konstan ketika kecepatan rotor berubah dari kecepatan sinkronnya. Apabila dihubungkan dengan energi kinetik dari massa yang bergerak, maka dijabarkan menjadi

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m^2$$
 (2.7)

$$M = \frac{2W_k}{W_m} = \frac{2W_k}{\omega_{sm}} \tag{2.8}$$

Selanjutnya lebih tepat apabila persamaan ayunan sebagai *electrical* power angle (δ). Asumsi p adalah jumlah kutub dari generator sinkron, maka sudut daya elektris akan berhubungan sudut daya mekanis (δ_m)

$$\delta = \frac{p}{2}\delta_m \tag{2.9}$$

Dengan melakukan substitusi antara persamaan (2.6) dan (2.9), maka diperoleh persamaan ayunan dari sudut daya elektris yaitu

$$\left(\frac{2M}{P}\right)\frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \left(\frac{2M}{P}\right)\ddot{\delta} = \left(\frac{2M}{P}\right)\dot{\omega} = P_a \tag{2.10}$$

Persamaan (2.10) menunjukkan hubungan daya akselerasi terhadap sudut daya δ dan kecepatan sudutnya pada medan magnet yang berputar dengan kecepatan ω . Untuk sistem yang lebih besar dan kompleks, maka perhitungan lebih mudah dengan mengubah satuan menjadi per-unit (p.u) yang memerlukan *base power* (*S*_{*B*}), dijelaskan dengan persamaan

$$P_{au} = \frac{P_a}{S_B} = \left(\frac{2M}{PS_B}\right)\ddot{\delta} = \left(\frac{2M}{PS_B}\right)\dot{\omega}$$
(2.11)

Pa adalah dalam bentuk p.u sedangkan M

$$\frac{2H}{\omega_S}\ddot{\delta} = M_{\dot{\omega}} = P_m - P_e \tag{2.12}$$

2.6 Gangguan Hubung Singkat

Pada suatu sistem kelistrikan, gangguan dapat menyebabkan perubahan pada kondisi operasionalnya. Gangguan dapat disebabkan oleh beberapa hal, antara lain kegagalan isolasi, *human error* maupun gangguan oleh faktor alam seperti petir, pohon tumbang maupun binatang. Hal-hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya hubung singkat. Akibat yang ditimbulkan dari hubung singkat adalah peningkatan arus dan tegangan yang melewati batas operasi normal. Hubung singkat dapat terjadi pada fasa (antar fasa) dan antara fasa ke tanah.

Gangguan dengan nilai terbesar adalah gangguan 3 fasa sehingga digunakan untuk menentukan spesifikasi rating pemutus daya, sedangkan gangguan dengan nilai terkecil adalah gangguan 2 fasa. Perhitungan gangguan 3 fasa seimbang dapat dilakukan dengan menggunakan analisis rangkaian ekuivalen satu fasa dengan menyamakan besaran menjadi per unit (pu). Perhitungan arus hubung singkat dengan cara memodelkan sistem menjadi matriks. Perkalian matriks admitansi dengan tegangan bus atau perkalian matriks impedansi dengan arus akan diperoleh nilai tegangan tiap bus.



Gambar 2.4 Gangguan 3 fasa ke tanah

Sebagai contoh sistem 4 bus dengan bus yang mengalami gangguan adalah bus 2. Perhitungan matriks Z bus adalah sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} V_{1\Delta} \\ -V_f \\ V_{3\Delta} \\ V_{4\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}Z_{12}Z_{13}Z_{14} \\ Z_{21}Z_{22}Z_{23}Z_{24} \\ Z_{31}Z_{32}Z_{33}Z_{34} \\ Z_{41}Z_{42}Z_{43}Z_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(2.13)

Dengan menyelesaikan matriks diatas maka diperoleh,

$$I_f = \frac{V_f}{z_{22}}$$
(2.14)

Dari perhitungan diatas, suatu gangguan secara umum yang terjadi pada bus k dengan mengabaikan arus pra gangguan adalah

$$I_f = \frac{V_f}{z_{kk}} \tag{2.15}$$

Tegangan pasca gangguan pada bus n adalah

$$V_n = V_f - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} V_f \tag{2.16}$$

2.7 Critical Clearing Time

Gangguan pada sistem kelistrikan sangat mempengaruhi kestabilan dari sistem tersebut. Gangguan yang tidak segera dihilangkan akan menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik sehingga dibutuhkan waktu pemutusan gangguan yang tepat agar sistem mampu mempertahankan stabilitasnya.
Critical clearing time (CCT) merupakan batas waktu kritis pemutusan dan penghilangan gangguan maksimal yang dapat dilakukan oleh peralatan proteksi tanpa mengganggu operasi normal sistem. Sistem tetap dikatakan stabil apabila gangguan berhasil dihilangkan sebelum batas nilai CCT, sebaliknya jika melebihi nilai CCT maka sistem berada pada kondisi tidak stabil dan jika tidak segera diatasi dapat menyebabkan *blackout*. Nilai CCT diperoleh berdasarkan gangguan terbesar yang dialami sistem yaitu hubung singkat tiga fasa.

Nilai CCT perlu dipertimbangkan untuk *setting* koordinasi proteksi pada suatu sistem kelistrikan dengan syarat nilai CCT harus memiliki waktu operasi lebih panjang daripada waktu operasi *circuit breaker* dan pola operasi sistem yang tepat. Kondisi tersebut diharapkan membuat sistem meningkat keandalannya.

2.8 Critical Trajectory

Metode *critical trajectory* (lintasan kritis) adalah sebuah metode berupa lintasan. Mulainya lintasan berawal dari titik terjadinya gangguan hingga mencapai titik kritis dimana sistem akan kehilangan sinkronisasi [8].



Gambar 2.5 Critical Trajectory

Gambar 2.5 tersebut menjelaskan mengenai *critical trajectory*. Terdapat empat parameter warna dalam grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu maupun grafik sudut rotor terhadap waktu yang dijelaskan sebagai berikut

a. Hitam : lintasan 1 menunjukkan gangguan/on-fault dan dimulai dari Stable Equilibrium Point (SEP).

- Biru : lintasan 2 menunjukkan kondisi stabil dimana gangguan diputus oleh CB kurang dari nilai CCT sistem dan akan mengalami osilasi mengelilingi SEP.
- c. Hijau : lintasan 3 menunjukkan kondisi kritis/critical trajectory yang merupakan batas antara kondisi stabil dan tidak stabil.
- Merah : lintasan 4 menunjukkan kondisi tidak stabil karena gangguan diputus oleh CB lebih dari nilai CCT sistem sehingga kehilangan sinkronisasi.

Berdasarkan lintasan ini dapat diamati batas kestabilan suatu sistem tenaga dan digunakan untuk meminimalisasi masalah perhitungan nilai UEP sehingga diperoleh nilai CCT untuk mencapai kestabilan sistem.

Perbandingan antara metode *critical trajectory* dengan TDS adalah waktu simulasi yang dibutuhkan untuk memperoleh nilai CCT yang ditunjukkan oleh CPU. Pada metode *critical trajectory* mampu memperoleh hasil lebih cepat. Waktu dalam simulasi metode *critical trajectory* diperoleh melalui keseluruhan waktu simulasi hingga mendapatkan nilai CCT dan bergantung pada jumlah iterasi tiap perhitungan. Perhitungan waktu simulasi metode TDS diperoleh melalui waktu *trial* dan *error* hingga mendapatkan nilai batas CCT yang sesuai, secara matematis dimodelkan dengan persamaan

$$CPU_{(s)} = n \times (T_n + T_{ct})$$
 2.17

dimana

CPU	=	waktu perhitungan simulasi
Ν	=	jumlah percobaan
T_n	=	waktu yang dibutuhkan tiap percobaan
T _{ct}	=	waktu simulasi metode critical trajectory

Pada beberapa percobaan, terdapat nilai *error* pada hasil percobaan. *Error* pada percobaan merupakan kondisi dimana nilai CCT berada diluar *range* nilai TDS. Terdapat dua nilai *error*, yaitu *error* positif dan negatif. Nilai *error* positif adalah kondisi pada saat nilai CCT metode *critical trajectory* diatas nilai TDS batas waktu tidak stabil (t_{ts}) , sedangkan nilai *error* negatif adalah kondisi saat nilai CCT dari metode *critical trajectory* berada dibawah nilai TDS batas waktu stabil (t_s) . Berikut persamaan untuk mencari error

$$error(+) = \frac{CCT - t_{ts}}{t_{ts}}$$
(2.18)

$$error(-) = \frac{CCT - t_s}{t_s}$$
(2.19)

2.9 Supercapasitor Energy Storage

Supercapasitor Energy Storage (SCES) merupakan suatu peralatan elektronik yang mampu menyimpan, melepas dan mengalirkan daya dengan cepat dalam intensitas yang tinggi menggunakan konversi daya. Prinsip kerja superkapitor identik dengan kapasitor dielektrik, yang membedakan yaitu luas permukaan kedua elektroda lebih besar dan terdapat suatu lapisan tipis diantara kedua elektroda tempat terpikatnya antar muatan yang tidak sejenis sehingga jarak antara dua muatan yang berbeda pada tiap elektroda semakin tipis [9].

Kemampuan superkapasitor untuk menyerap dan menyalurkan daya dengan cepat inilah yang akan dimanfaatkan untuk analisis kestabilan transien yang akan dijelaskan pada bab selanjutnya.

2.10 CCT sebagai Pertimbangan Koordinasi Proteksi

Sistem kelistrikan dapat dikatakan andal jika mampu memutus gangguan tanpa menyebabkan ketidakstabilan, oleh karena itu dibutuhkan sistem koordinasi proteksi. Koordinasi proteksi dilakukan dengan cara mengatur kerja antar peralatan proteksi yaitu relay, yang nantinya akan memerintahkan *circuit breaker* untuk memutus gangguan [10].

Dalam pengaturan koordinasi proteksi, kestabilan transien perlu dijadikan suatu pertimbangan. Kestabilan transien sendiri dinyatakan dalan bentuk nilai CCT, dengan kata lain nilai CCT menjadi batas waktu dari peralatan pengaman bekerja untuk mengamankan gangguan. Pada tugas akhir ini akan mengoptimalkan nilai CCT dengan menambah SCES sehingga nilai CCT mampu menyesuaikan waktu operasi peralatan pengaman. Waktu operasi peralatan menggunakan referensi sesuai pada Tabel 2.1.

Onereci Delev	Tipe relay			
Operasi Kelay	Statis	Elektromekanis		
Waktu membuka circuit breaker	0.08 s	0.08 s		
Relay overtravel	0.00 s	0.10 s		
Toleransi relay dan error	0.12 s	0.12 s		
Total CTI	0.2 s	0.30 s		

 Tabel 2.1 Clearing Time Inteval

BAB 3 METODE PERHITUNGAN

3.1 Diagram Alur

Pada sub-bab ini akan dijelaskan mengenai alur kerja melalui dua diagram. Gambar 3.1 menunjukkan diagram alur kerja untuk metode critical trajectory pada kondisi sebelum SCES terpasang, sedangkan Gambar 3.2 menunjukkan kondisi setelah pemasangan SCES.



Gambar 3.1 Diagram alur pengerjaan metode critical trajectory

Langkah-langkah perhitungan metode *critical trajectory* sesuai Gambar 3.1 dimulai dengan analisis aliran daya, kemudian dilakukan reduksi matriks jaringan pada kondisi *pre-fault*, *on-fault* dan *post fault*. Setelah itu metode runge kutta diterapkan untuk menghitung nilai δ dan ω untuk penentuan titik-titik lintasan *critical trajectory*. Titik-titik tersebut akan dihubungkan dengan metode *trapezoidal*, membentuk sebuah lintasan menuju titik *unstable equilibrium point* (UEP) dengan metode modifikasi *losing synchronism* untuk mengetahui nilai CCT.



Gambar 3.2 Diagram alur pengerjaan metode *critical trajectory* dengan penambahan SCES.

3.2 Parameter Modifikasi Sistem 4 Mesin Anderson dan Fouad

Sistem yang digunakan adalah modifikasi 4 mesin fouad anderson dengan pemodelan beberapa titik gangguan dengan jenis gangguan hubung singkat tiga fasa dengan kondisi AVR dan *governor* belum bekerja saat terjadi gangguan. *Single Line Diagram* untuk sistem tersebut ditunjukkan oleh Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Single Line Diagram Modifikasi 4 Mesin Anderson dan Fouad

Deskripsi untuk letak titik gangguan sebagai berikut

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

Pada *single line diagram* yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3, diasumsikan bahwa sistem menggunakan saluran ganda/*double circuit*. Ketika terjadi gangguan hubung singkat pada salah satu saluran, diharapkan saluran yang tidak terkena gangguan tetap mengalirkan daya sehingga kontingensi sistem dapat terjaga.

Spesifikasi dan parameter pembangkit, saluran transmisi serta beban di tiap bus sistem modifikasi 4 mesin Anderson dan Fouad dijelaskan oleh Tabel 3.1.

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

 Tabel 3.1 Data Saluran Sistem Modifikasi 4 Mesin Anderson dan Fouad

Data tegangan, daya yang dibangkitkan serta beban tiap bus ditunjukkan oleh Tabel 3.2

No.	Tegangan	Da	ya	Be	ban
	Bus (pu)	P(MW)	Q (Mvar)	P (MW)	Q (Mvar)
1	1,040	200	0	0	0
2	1,025	163	0	0	0
3	1,025	85	0	0	0
4	1	0	0	0	0
5	1	0	0	125	50
6	1	0	0	90	30
7	1	0	0	0	0
8	1	0	0	100	35
9	1,025	45	0	0	0

Tabel 3.2 Data tegangan, daya serta beban tiap bus.

Berdasarkan Gambar 3.1, setelah diperoleh data dari analisis aliran daya, dilakukan reduksi matriks untuk mempermudah perhitungan

selanjtunya. Selanjutnya, metode runge kutta orde ke-4 memodelkan sistem dari hasil perhitungan daya mekanis dan elektris sistem untuk memperoleh nilai kecepatan sudut rotor (ω) dan sudut rotor (δ). Nilai ω dan δ dalam pemodelan kurva *critical trajectory* berupa titik-titik yang akan dihubungkan oleh garis menuju titik *losing synchronism*. Penggabungan titik-titik ini menggunakan metode modifikasi *trapezoidal*.

No.	Data Generator	Daya Mekanis (p.u)
1	Generator 1	0,2898
2	Generator 2	1,63
3	Generator 3	0,85
4	Generator 4	0,45

Tabel 3.3 Data Daya Mekanis (Pm)

3.3 Analisis Aliran Daya

Analisis aliran daya pada suatu sistem tenaga listrik digunakan untuk mengetahui nilai *magnitude* dan sudut tegangan tiap bus dalam kondisi *steady-state* sehingga nilai daya aktif, daya reaktif, perbedaan aliran daya dari sisi kirim dan terima serta rugi-rugi saluran dapat dihitung. Selain itu, dari data saluran dapat diketahui pula kondisi beban ketika mengalami kelebihan maupun kekurangan *supply* daya [8]. Hasil dari analisis aliran daya digunakan untuk penentuan kondisi inisial kestabilan transien. Parameter yang diamati adalah respon sudut rotor (δ) dan daya mekanis (Pm) yang dihitung berdasarkan perubahan tegangan dari analisis aliran daya.

Perhitungan aliran daya dilakukan dengan menggunakan proses iterasi. Proses iterasi dilakukan hingga mencapai nilai minimum *error* yang ditentukan. Metode yang digunakan untuk perhitungan aliran daya pada tugas akhir ini adalah Newton-Raphson.

3.3.1 Metode Newton-Raphson

Metode newton-raphson merupakan pengembangan dari deret taylor memperoleh turunan persamaan untuk penentuan matrik Jacobian sebagai dasar perhitungan iterasi. Metode ini menggunakan solusi hampiran dan banyak digunakan karena cepat untuk mencapai konvergen. Untuk memperoleh nilai daya aktif dan reaktif, perlu dilakukan pemodelan matematika sebagai berikut :

Tegangan pada bus *i* :

Rectangular $V_i = |V_i|(\cos\delta_i + j\sin\delta_i)$ (3.1)

Polar
$$V_i = |V_i| < \delta_i$$
 (3.2)

Euler
$$V_i = |V_i|e^{\delta_i}$$
 (3.3)

Rumus admitansi :

$$Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \tag{3.4}$$

Dimana

 $G_{ii} = konduktansi$

 $B_{ii} = suseptansi$

Nilai admintansi bus i terhadap bus i

$$Y_{ii} = |Y_{ii}|e^{\theta ii} = |Y_{ii}| < \theta_{ii} = |Y_{ii}|(\cos\theta_{ii} + j\sin\theta_{ii})$$
(3.5)

Sehingga

$$G_{ii} = |Y_{ii}| \cos\theta_{ii} \tag{3.6}$$

$$B_{ii} = |Y_{ii}| \sin\theta_{ii} \tag{3.7}$$

Selanjutnya pemodelan matriks dengan jumlah bus n

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{in} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{in} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_n \end{bmatrix}$$
(3.8)

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + Y_{i3}V_3 + \dots + Y_{in}V_{in}$$
(3.9)

$$I_i = \sum_i^n \sum_j^n Y_{ij} V_i \tag{3.10}$$

Maka persamaan daya aktif dan reaktif untuk kondisi lagging pada bus i (arus tertinggal oleh teganan atau saat beban induktif) adalah :

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



Gambar 3.4 Ilustrasi Metode Newton-raphson

Selanjutnya dengan menggunakan pendekatan linier persamaan deret Taylor

$$F(x) = F(x_0) + \frac{dF(x_0)}{dx}(x - x_0)$$
(3.12)

Secara umum dapat dinyatakan dengan

$$\frac{df(x)}{dx}\Delta x = \Delta f \tag{3.13}$$

3.3.2 Matriks Jacobian

Pengaplikasian metode newton-raphson dalam perhitungan aliran daya sistem multimesin akan menghasilkan matriks jacobian dengan dimensi n-1, dimana n merupakan jumlah generator pada sistem dikurangi dengan jumlah *swing* bus pada sistem yang umumnya terdapat satu *swing* bus. Jenis swing bus nilai tegangan dan sudut telah diketahui dan nilainya tetap sehingga tidak perlu dimasukkan dalam perhitungan. Perhitungan matriks jacobian didefinisikan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial v_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial v_n} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial Q_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial v_1} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial Q_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial Q_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial Q_1} & \cdots & \frac{\partial Q_n}{\partial Q_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \frac{\Delta V_1}{|V_1|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_n}{|V_n|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}$$
(3.14)

Dari persamaan (3.14) dapat diturunkan menjadi persamaan seperti berikut

$$\begin{bmatrix} H_{ij} & N_{ij} \\ I_{ij} & L_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix}$$
(3.15)

Dengan penjabaran masing-masing komponen

$$H = \frac{\partial P_I}{\partial \theta_j} \tag{3.16}$$

$$N = \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} |V_j| \tag{3.17}$$

$$J = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \tag{3.18}$$

$$L = \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} |V_j| \tag{3.19}$$

3.4 Reduksi Matriks

Pada analisis sistem tenaga skala besar, diperlukan pemodelan secara matematis dalam bentuk analisis matriks. Penyederhanaan analisis matriks diperlukan ketika sistem yang digunakan adalah sistem interkoneksi skala besar. Penyederhanaan ini diperlukan untuk mengurangi kompleksitas jaringan dan memudahkan perhitungan matematis. Metode yang digunakan adalah reduksi matriks kron.

Perhitungan reduksi kron pada analisis kestabilan transien dilakukan pada saat terjadi gangguan seperti hubung singkat sehingga dianggap arus kontribusi akibat gangguan hanya berasal dari sumber dan pada beban tidak mengalir arus. Oleh karena itu *load* bus dapat direduksi dari matriks sistem. Untuk merepresentasikan matriks admintansi dari sistem dapat dilihat pada persamaan berikut

$$\begin{bmatrix} 0\\I_2\\I_3\\I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14}\\Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24}\\Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34}\\Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1\\V_2\\V_3\\V_4 \end{bmatrix}$$
(3.20)

Pada persamaan (3.20) dimisalkan I_0 adalah bus yang tidak dialiri arus, maka nilai $I_0 = 0$ sehingga dapat direduksi menjadi

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{22}^{(new)} & Y_{23}^{(new)} & Y_{24}^{(new)} \\ Y_{32}^{(new)} & Y_{33}^{(new)} & Y_{34}^{(new)} \\ Y_{42}^{(new)} & Y_{43}^{(new)} & Y_{44}^{(new)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$
(3.21)

Elemen baru matriks admitansi setelah dilakukan reduksi jaringan dengan kron menghasilkan persamaan berikut :

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk(old)} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}}$$
 (3.22)

Dimana

J dan k : bus pada sistem kecuali bus yang direduksi P : bus yang direduksi

3.5 Pemodelan Sistem

Mengacu pada persamaan ayunan yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, perlu dilakukan pemodelan sistem untuk mendapatkan parameter tersebut. Pemodelan generator ditunjukkan oleh Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Pemodelan Generator

Pada generator sinkron, adanya reaksi jangkar menyebabkan selisih antara tegangan internal generator (E_A) dengan tegangan *output* generator (V_{\emptyset}). Saat rotor generator sinkron berputar, tegangan E_A terbangkit di belitan stator melalui induksi. Arus yang mengalir menuju beban akan menghasilkan medan magnet pada stator menyebabkan perubahan pada medan magnet di rotor sehingga mengubah nilai tegangan fasa (V_{θ}). Penjelasan berdasarkan rumus ditunjukkan oleh persamaan (3.23) berikut

$$V_{\theta} = E_A + E_{stat} \tag{3.23}$$

Medan magnet yang dihasilkan merupakan penjumlahan medan magnet di rotor dengan medan magnet di stator :

$$B_{net} = B_R + B_S \tag{3.24}$$

Dari Gambar 3.5 dapat ditulis dengan persamaan

$$E_a = V_t + jX'_d I \tag{3.25}$$

Dari persamaan tersebut maka daya mekanis dari generator dapat diperoleh dengan rumus :

$$P_m = E_a^* \times Y_{red_pre}. E_a \tag{3.26}$$

dimana :

P_m	=	Daya mekanis
Ea	=	Tegangan internal generator
Y_{red_pre}	=	Admitansi tiap saluran sebelum gangguan

Persamaan untuk mencari daya elektris adalah

$$P_e = v \times \left(Y_{red_{post}} \times v\right)^* \tag{3.27}$$

dimana

 P_e = Daya elektris v = Tegangan bus $Y_{red pre}$ = Admitansi tiap

 Y_{red_pre} = Admitansi tiap saluran setelah gangguan

Nilai v dapat diperoleh dari persamaan

$$v = E_a^{j\theta} \tag{3.28}$$

 θ merupakan hasil iterasi dari nilai inisial awal yaitu θ_{COI}

$$\theta_{COI} = \delta_i - \delta_0 \tag{3.29}$$

 δ_i merupakan sudut rotor generator sedangkan δ_0 diperoleh dari jumlah momen inersia dan sudut rotor generator dibagi dengan jumlah total momen inersia

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \times \delta_i \tag{3.30}$$

Persamaan dari pemodelan sistem diatas memerlukan referensi yang berbeda-beda, sehingga perlu ditransformasukan ke persamaan *Center of Inertia* (COI) sehingga memiliki referensi yang sama. Persamaan COI ditunjukkan dengan persamaan

$$P_{coi} = \sum_{i=1}^{N} P_{mi} - P_{ei}$$
(3.31)

Sehingga persamaan ayunan menjadi :

$$M_i \dot{\omega} = P_{mi} - P_{ei}(\delta) - \frac{M_i}{M_t} P_{coi}$$
(3.32)

Dimana :

P_{mi}	=	Daya mekanis generator i
P_{ei}	=	Daya elektris generator <i>i</i>
M_i	=	Momen inersia generator <i>i</i>
M_T	=	Total momen inersia
P _{coi}	=	Daya keseimbangan sebagai referensi sinkron

3.6 Metode Runge-Kutta Orde Empat

Metode runge kutta digunakan untuk memperoleh hasil dari perhitungan suatu persamaan diferensial. Metode ini dibandingkan dengan metode euler memiliki ketelitian yang lebih tinggi dan hanya memerlukan nilai-nilai fungsi dari titik-titik yang dipilih pada suatu interval. Metode ini juga mampu menyelesaikan orde tinggi metode deret taylor karena tidak memerlukan turunan perhitungan.

Penggunaan metode runge kutta orde 4 dengan nilai x pada waktu $t = t_0 + \Delta T$ dijelaskan dengan persamaan umum sebagai berikut

$$x_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$
(3.33)

dimana

$$k_1 = f(x_n, t_n)\Delta_T \tag{3.34}$$

$$k_{2} = f(x_{n} + \frac{k_{1}}{2}, t_{n} + \frac{\Delta_{T}}{2})\Delta_{T}$$
(3.35)

$$k_3 = f(x_n + \frac{k_2}{2}, t_n + \frac{\Delta_T}{2})\Delta_T$$
 (3.36)

$$k_4 = f(x_n + k_3, t_n + \Delta_T) \Delta_T$$
 (3.37)

Keterangan untuk variable diatas adalah sebagai berikut

- k_1 : Slope pada time step pertama dikali ΔT
- k_2 : Perhitungan pertama untuk slope pada *mid step* dikali ΔT
- k_3 : Perhitungan kedua untuk slope pada *mid step* dikali ΔT
- k_4 : Slope pada step terakhir dikali ΔT

3.7 Metode *Critical Trajectory*

Terdapat tiga kondisi pada analisis kestabilan transien yaitu kondisi sebelum terjadi gangguan, selama gangguan dan setelah gangguan [8]. Kondisi awal yaitu sebelum gangguan (X_{pre}) adalah kondisi saat sistem beroperasi pada titik kestabilannya. Kemudian muncul gangguan pada saat t=0 hingga t= τ atau dapat dikatakan sistem mengalami gangguan selama [0, τ] ditunjukkan oleh persamaan

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \le t \le \tau, x(0) = x_{pre}$$
 (3.38)

dimana
$$x \in \mathbb{R}^N, t \in \mathbb{R}, f_F: \mathbb{R}^N \to \mathbb{R}^N$$
 (3.39)

Kurva solusi untuk persamaan (3.38) disebut fault-on trajectory dan dirumuskan dengan

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

$$X_F(t; x_{pre}): R \to R^N \tag{3.41}$$

Saat gangguan dapat dihilangkan dalam waktu τ , sistem diatur oleh kestabilan dinamis *post-fault* sesuai persamaan

$$\dot{x} = f(x), \tau \le t \le \infty; f: \mathbb{R}^N \to \mathbb{R}^N$$
(3.42)

Kurva solusi untuk persamaan (3.42) disebut *post-fault trajectory* dan dirumuskan dengan

$$x(t) = X(t; x^{0}), \tau \le t \le \infty; X(t; x^{0}: \mathbb{R}^{N} \to \mathbb{R}^{N})$$
(3.43)

Dengan asumsi titik awal x^0 adalah titik saat fault-on trajectory pada waktu τ , maka dapat disederhanakan menjadi

$$x^0 = X_f(\tau; x_{pre}) \tag{3.44}$$

Titik awal persamaan diatas adalah pada lintasan gangguan saat gangguan dihilangkan pada waktu kritis, sehingga dapat ditulis menjadi

$$x^0 = X_f(CCT; x_{pre}) \tag{3.45}$$

3.7.1 Metode Modifikasi Trapezoidal

Metode *trapezoidal* merupakan langkah mula untuk menggambarkan *critical trajectory*. Pada saat t^k variabel t diubah menjadi x sehingga notasinya menjadi x^k , maka persamaan *trapezoidal* konvensional yaitu

$$x^{k+1} - x^{k} = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^{k})(t^{k+1} - t^{k})$$
(3.46)

dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k) \tag{3.47}$$

Lambang k merupakan iterasi terhadap waktu.



Gambar 3.6 Modifikasi trapezoidal

Sesuai dengan bab sebelumnya yang menyebutkan bahwa *critical trajectory* merupakan suatu lintasan yang dimulai dari lintasan gangguan sampai titik kritis dimana gangguan dapat dihilangkan (*state variable* konvergen di titik kritis). Namun yang menjadi permasalahan, titik kritis tersebut dapat mencapai UEP pada waktu tak hingga. Gambar 3.6 mengilustraksikan *critical trajectory*, dimana terdapat dua titik x⁰ merepresentasikan pemutusan gangguan pada CCT dan x^u titik kritis saat mencapai UEP. Untuk mencapai nilai UEP dengan batas waktu tertentu, maka dilakukan modifikasi persamaan *trapezoidal*. Langkah pertama yaitu mendefinisikan jarak antara kedua titik menjadi

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

Langkah kedua yaitu mengubah waktu t pada menjadi domain jarak

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

Kemudian persamaan (3.49 disubstitusikan ke persamaan (3.46 menjadi

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

Proses transformasi yang direpresentasikan dengan persamaan (3.50) lebih memungkinkan untuk menggambarkan *critical trajectory* dengan nilai batas waktu yang mempunyai jarak.

3.7.2 Modifikasi Losing Synchronism

Pada Gambar 3.6 menurut metode *trapezoidal*, lintasan kritis akan menyatu dengan UEP. Namun pemodelan tersebut kurang tepat jika digunakan untuk sistem multimesin, sehingga diberi penambahan parameter kondisi kritis untuk sinkronisasi. Sinkronisasi pada suatu mesin akan hilang jika nilai dari $\frac{\partial T}{\partial \theta} = 0$ atau $\frac{\partial P}{\partial \theta} = 0$. T dan P merupakan torsi sinkronisasi dan daya, sedangkan θ merupakan sudut rotor [2]. Pada sistem multi mesin, koefisien sinkronisasi ditunjukkan oleh persamaan (3.51).

$$\left[\frac{\partial P}{\partial \theta}\right] v = 0 \tag{3.51}$$

v merupakan eigenvector yang berhubungan dengan eigenvalue 0. Jika diasumsikan nilai eigenvector sama dengan perubahan θ , maka nilai v menjadi :

$$v = k_s.\dot{\theta} \tag{3.52}$$

Nilai dari k_s dianggap konstan untuk mereduksi jumlah dari persamaan sehingga

$$k_s = 1 \tag{3.53}$$

Hasil perhitungan dapat lebih cepat dibandingkan metode losing synchronism konvensional. Persamaan modifikasi losing synchronism adalah

$$\left[\frac{\partial P}{\partial \theta}\right].\dot{\theta} = 0 \tag{3.54}$$

3.8 Penambahan Supercapasitor Energy Storage

Menurut penjelasan bab sebelumnya mengenai pengaruh karakteristik superkapasitor terhadap kestabilan sistem, superkapasitor mampu menyerap dan menyalurkan daya secara cepat. Pada tugas akhir ini, superkapasitor dimodelkan hanya dalam kondisi menyerap saat terjadi gangguan.

Saat terjadi gangguan, akan terjadi osilasi akibat nilai daya elektris mengalami penurunan sehingga dapat menyebabkan sistem kehilangan

sinkron. Pemasangan superkapasitor diharapkan mampu menyerap daya mekanis atau seolah-olah superkapasitor bekerja sebagai beban. Superkapasitor diletakkan pada salah satu bus generator kemudian akan dilihat respon dari sistem. Pemodelan P_{sces} secara matematis [2] ditunjukkan oleh persamaan berikut

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) \frac{M_i}{M_t} P_{coi} - P_{sces}$$
(3.55)

Keterangan

М	=	Momen inersia
ŵ	=	Kecepatan sinkron (rad/s)
P_m	=	Daya mekanis (pu)
P_e	=	Daya elektris (pu)
M_i	=	Momen inersia generator <i>i</i>
M_T	=	Total momen inersia
P_{coi}	=	Daya keseimbangan sebagai referensi sinkron
Psces	=	Daya superkapasitor (pu)

Sedangkan nilai dari P_{sces} diperoleh dari persamaan

$$P_{sces} = \frac{MVA_{sces}}{MVA_{base}}$$
(3.56)

Nilai MVA_{Sces} yang digunakan pada tugas akhir ini adalah 10 MVA hingga 100 MVA, sedangkan nilai MVA_{Base} adalah 100 MVA_{base}. Peletakan dari superkapasitor sendiri adalah di bus generator dan pada tugas akhir ini diasumsikan diletakkan pada bus generator 2.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi tentang hasil simulasi dan analisis dari program *critical trajectory* dengan perbandingan antara kondisi sebelum penambahan SCES dan sesudah penambahan SCES. Analisis perhitungan CCT dilakukan dengan memperhatikan kondisi gangguan hubung singkat tiga fasa pada lima titik gangguan, yaitu titik gangguan A, titik gangguan B, titik gangguan C, titik gangguan D dan titik gangguan E seperti dijelaskan pada Gambar 3.3. Analisis terakhir yaitu penentuan kapasitas optimal SCES dengan mempertimbangkan *setting* proteksi pada sistem.

4.1 Analisis CCT tanpa SCES

Pada simulasi ini dilakukan analisis nilai *critical clearing time* ketika terjadi gangguan tiga fasa ke tanah sebelum SCES diletakkan pada sistem. Analisis ini akan menunjukkan nilai CCT sistem dengan metode *critical trajectory* dengan validasi nilai CCT metode TDS.

4.1.1 Analisis nilai CCT akibat Gangguan tiga fasa ke tanah

Gangguan tiga fasa ke tanah berdasarkan simulasi ditunjukkan oleh Tabel 4.1 terjadi pada ketiga fasanya. Parameter yang diperoleh berdasarkan simulasi yaitu nilai CCT, waktu iterasi serta *error*. Nilai *error* merupakan perbandingan antara metode *critical trajectory* dengan metode *time domain simulation* (TDS) sesuai persamaan (2.18) dan (2.19).

Fault	Open Line	Critical Trajectory		Time Domain Simulation		Error
	Line	CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	(3)
А	1-4	0,2890	2,1342	0,29-0.30	121,342	-0,001
В	2-7	0,2085	0,385	0,20-0.21	103,850	0
С	4-5	0,2860	0,4642	0,28-0.29	104,642	0
D	4-6	0,2839	0,4306	0,28-0.29	104,306	0
E	5-7	0,2034	0,4127	0,21-0.22	104,127	-0,0066

Tabel 4.1 Nilai CCT tiap titik gangguan tanpa SCES

Metode TDS menghasilkan nilai CCT dalam *range* waktu antara nilai stabil dan tidak stabil, sedangkan metode *critical trajectory* langsung

menampilkan nilai CCT. Terdapat *error* nilai CCT pada titik gangguan di A dan gangguan di E, namun *error* ini bersifat lebih baik dikarenakan nilainya berada di daerah stabil dan nilai errornya sangat kecil (pemutusan gangguan lebih cepat dibandingkan CCT metode TDS dan sistem masih dalam kondisi stabil).

4.1.2 Analisis Grafik

Grafik yang diamati dari hasil simulasi ini adalah grafik respon kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ). Grafik tersebut menjadi parameter untuk mengetahui apakah nilai CCT dari program *critical trajectory* sudah tepat atau belum. Penjelasan grafik masingmasing titik gangguan sebagai berikut

• Titik Gangguan A

Saat gangguan di titik A, yaitu pada saluran antara bus 1-4 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,289 detik, sedangkan nilai CCT dari metode TDS adalah dalam range 0,29-0,3 detik. Terdapat selisih nilai sebesar -0,001 s antara nilai CCT metode *critical trajectory* dengan metode TDS. Gambar 4.1 menunjukkan setelah lintasan gangguan, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.



Gambar 4.1 Respon ω terhadap δ di titik gangguan A.

Titik Gangguan B

Saat gangguan di titik B, yaitu pada saluran antara bus 2-7 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2085 detik, sedangkan nilai CCT dari metode TDS adalah dalam range 0,2-0,21 detik. Tidak ada selisih antara kedua metode karena nilai CCT metode *critical trajectory* berada pada range metode TDS. Pada Gambar 4.2 menunjukkan setelah lintasan gangguan, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.



Gambar 4.2 Respon ω terhadap δ di titik gangguan B.

Titik Gangguan C

Saat gangguan di titik C, yaitu pada saluran antara bus 4-5 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2860 detik, sedangkan nilai CCT dari metode TDS adalah dalam range 0,28-0,29 detik. Tidak ada selisih antara kedua metode karena nilai CCT metode *critical trajectory* berada pada range metode TDS.

Pada Gambar 4.3 menunjukkan setelah lintasan gangguan, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.



Gambar 4.3 Respon ω terhadap δ di titik gangguan C.

Titik Gangguan D

Saat gangguan di titik D, yaitu pada saluran antara bus 4-6 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2839 detik, sedangkan nilai CCT dari metode TDS adalah dalam range 0,28-0,29 detik. Tidak ada selisih antara kedua metode karena nilai CCT metode *critical trajectory* berada pada range metode TDS.



Gambar 4.4 Respon ω terhadap δ di titik gangguan D.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan setelah lintasan gangguan, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil

Titik Gangguan E

Saat gangguan di titik E, yaitu pada saluran antara bus 5-7 nilai CCT yang diperoleh dari metode *critical trajectory* adalah 0,2034 detik, sedangkan nilai CCT dari metode TDS adalah dalam range 0,21-0,22 detik. Terdapat selisih nilai sebesar -0,0066 s antara nilai CCT metode *critical trajectory* dengan metode TDS. Pada Gambar 4.5 menunjukkan setelah lintasan gangguan, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.



Gambar 4.5 Respon ω terhadap δ di titik gangguan E.

4.2 Analisis Penambahan SCES pada Sistem

Pada sub bab ini membahas tentang analisis penambahan SCES terhadap nilai *critical clearing time*. SCES diletakkan pada bus generator kritis yaitu bus generator dua. Pada saat terjadi gangguan, maka SCES akan menyerap daya mekanis (Pm) yang berlebih akibat daya elektris (Pe) yang turun. Langkah perhitungan dan analisis nilai CCT akibat penambahan SCES dilakukan seperti Gambar 3.2. Gambar yang diamati adalah gambar kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) pada

generator 2, namun dalam analisis perlu melihat kondisi generator lain. Berdasarkan persamaan (3.56), maka nilai 0,1 pu adalah 10 MVA sedangkan 1 pu adalah 100 MVA.

4.2.1 Analisis Pada Titik Gangguan A

Pada saat gangguan tiga fasa pada titik A, dilakukan simulasi pemasangan SCES dengan Δ SCES sebesar 0,1 pu hingga 1 pu. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan nilai SCES menyebabkan penambahan nilai CCT. Δ CCT terkecil adalah 0,017 detik pada saat nilai SCES 0,1 pu dan Δ CCT terbesar adalah 0,2724 detik pada saat nilai SCES 1 pu, secara grafik dapat dilihat pada Gambar 4.7. Terdapat selisih perhitungan nilai CCT metode *critical trajectory* dengan TDS pada saat penambahan SCES 0,9 pu dan 1 pu, namun dapat ditolerir karena nilainya sangat kecil dan berada pada daerah kondisi stabil.

Nilai SCES	Crit Traje	tical ectory	Time Domain Simulation		ΔCCT	Error (s)
(pu)	CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	(-)	
0	0,2890	2,1342	0,29-0,30	121,342	-	-0,001
0,1	0,3060	0,4016	0,30-0,31	104,016	0,0170	0
0,2	0,3241	0,3633	0,32-0,33	103,633	0,0351	0
0,3	0,3437	0,3565	0,34-0,35	103,565	0,0547	0
0,4	0,3653	0,2880	0,36-0,37	102,880	0,0763	0
0,5	0,3893	0.4049	0,39-0,40	104,049	0,1003	0
0,6	0,4161	0,2588	0,41-0,42	102,588	0,1271	0
0,7	0,4466	0,3561	0,44-0,45	103,561	0,1576	0
0,8	0,4806	0,3893	0,48-0,49	103,893	0,1916	0
0,9	0,5190	0,3377	0,52-0,53	103,377	0,2300	-0,001
1	0,5614	0,4148	0,57-0,58	104,148	0,2724	-0,0086

Tabel 4.2 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik A

Dari Gambar 4.6 yang menunjukkan perbandingan kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) di titik gangguan A ketika terjadi penambahan nilai SCES, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.



Gambar 4.6 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,2 pu.



Gambar 4.7 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan Δ CCT sistem di titik gangguan A

4.2.2 Analisis Pada Titik Gangguan B

Pada saat gangguan tiga fasa pada titik B, dilakukan simulasi pemasangan SCES dengan Δ SCES sebesar 0,1 pu hingga 1 pu. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan nilai SCES menyebabkan

penambahan nilai CCT. Δ CCT terkecil adalah 0,016 detik pada saat nilai SCES 0,1 pu dan Δ CCT terbesar adalah 0,2618 detik pada saat nilai SCES 1 pu, secara grafik dapat dilihat pada Gambar 4.9. Terdapat selisih perhitungan nilai CCT metode *critical trajectory* dengan TDS pada saat penambahan SCES 0,3 pu, 0,5 pu, 0,6 pu dan 0,7 pu, namun dapat ditolerir karena nilainya sangat kecil.

Nilai SCES	Crit Traje	Critical Trajectory		Time Domain Simulation		Error
(pu)	CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	(3)	(3)
0	0,2085	0,3850	0,20-0,21	103,850	-	0
0,1	0,2245	0,4799	0,22-0,23	104,799	0,0160	0
0,2	0,2416	0,3893	0,24-0,25	103,893	0,0331	0
0,3	0,2602	0,4302	0,25-0,26	104,302	0,0517	0,0002
0,4	0,2727	0,3050	0,27-0,28	103,050	0,0642	0
0,5	0,2931	0,3674	0,30-0,31	103,674	0,0846	-0,0069
0,6	0,3174	0,3783	0,32-0,33	103,783	0,1089	-0,0026
0,7	0,3467	0,3414	0,35-0,36	103,414	0,1382	-0,0033
0,8	0,3842	0,3172	0,38-0,39	103,172	0,1757	0
0,9	0,4247	0,5530	0,42-0,43	105,530	0,2162	0
1	0,4703	0,4329	0,47-0,48	104,329	0,2618	0

Tabel 4.3 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik B



Gambar 4.8 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,3 pu

Dari Gambar 4.8 yang menunjukkan perbandingan kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) di titik B ketika terjadi penambahan nilai SCES, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.



Gambar 4.9 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan \triangle CCT sistem di titik gangguan B.

4.2.3 Analisis Pada Titik Gangguan C

Pada saat gangguan tiga fasa pada titik C, dilakukan simulasi pemasangan SCES dengan Δ SCES sebesar 0,1 pu hingga SCES mencapai nilai 1 pu. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan nilai SCES menyebabkan penambahan nilai CCT. Δ CCT terkecil adalah 0,0152 detik pada saat nilai SCES 0,1 pu dan Δ CCT terbesar adalah 0,2368 detik pada saat nilai SCES 1 pu, secara grafik dapat dilihat pada Gambar 4.11. Tidak terdapat selisih perhitungan nilai CCT metode critical trajectory dengan TDS.

Gambar 4.10 yang menunjukkan perbandingan kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) di titik C ketika terjadi penambahan nilai SCES, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.

Nilai SCES	Critical Trajectory		Time Do Simulo	omain Ition		Error
(pu)	CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	(8)	(8)
0	0,2860	0,4642	0,28-0,29	104,642	-	0
0,1	0,3012	0,4742	0,30-0,31	104,742	0,0152	0
0,2	0,3171	0,4669	0,31-0,32	104,669	0,0311	0
0,3	0,3342	0,3847	0,33-0,34	103,847	0,0482	0
0,4	0,3527	0,4029	0,35-0,36	104,029	0,0667	0
0,5	0,3730	0,4065	0,37-0,38	104,065	0,0870	0
0,6	0,3956	0,3452	0,39-0,40	103,452	0,1096	0
0,7	0,4210	0,3698	0,42-0,43	103,698	0,1350	0
0,8	0,4500	0,3776	0,45-0,46	103,776	0,1640	0
0,9	0,4836	0,3450	0,48-0,49	103,450	0,1976	0
1	0,5614	0,4148	0,57-0,58	103,568	0,2368	0

Tabel 4.4 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik C



Gambar 4.10 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,5 pu



Gambar 4.11 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan \triangle CCT sistem di titik gangguan C

4.2.4 Analisis Pada Titik Gangguan D

Pada saat gangguan tiga fasa pada titik D, dilakukan simulasi pemasangan SCES dengan Δ SCES sebesar 0,1 pu hingga SCES mencapai nilai 1 pu. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan nilai SCES menyebabkan penambahan nilai CCT. Δ CCT terkecil adalah 0,0152 detik pada saat nilai SCES 0,1 pu dan Δ CCT terbesar adalah 0,2370 detik pada saat nilai SCES 1 pu, secara grafik dapat dilihat pada Gambar 4.13. Terdapat selisih perhitungan nilai CCT metode *critical trajectory* dengan TDS pada saat penambahan SCES 0,5 pu, namun dapat ditolerir karena nilainya sangat kecil.

Dari Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) di titik D ketika terjadi penambahan nilai SCES, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.

Nilai SCES	Critical Trajectory		Time Domain Simulation			Error
(pu)	CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	(3)	(3)
0	0,2839	0,4306	0,28-0,29	104,306	-	0
0,1	0,2991	0,4794	0,29-0,30	104,794	0,0152	0
0,2	0,3152	0,3722	0,31-0,32	103,722	0,0313	0
0,3	0,3324	0,3606	0,33-0,34	103,606	0,0485	0
0,4	0,3511	0,4960	0,35-0,36	104,960	0,0672	0
0,5	0,3715	0,4184	0,36-0.37	104,184	0,0876	0,0015
0,6	0,3941	0,3563	0,39-0,41	103,563	0,1102	0
0,7	0,4200	0,3352	0,42-0,43	103,352	0,1361	0
0,8	0,4489	0,3771	0,28-0,29	103,771	0,1650	0
0,9	0,4822	0,3204	0,29-0.30	103,204	0,1983	0
1	0,5209	0,3347	0,31-0,32	103,347	0,2370	0

Tabel 4.5 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik D



Gambar 4.12 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,7 pu



Gambar 4.13 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan \triangle CCT sistem di titik gangguan D

4.2.5 Analisis Pada Titik Gangguan E

Pada saat gangguan tiga fasa pada titik E, dilakukan simulasi pemasangan SCES dengan Δ SCES sebesar 0,1 pu hingga SCES mencapai nilai 1 pu. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan nilai SCES menyebabkan penambahan nilai CCT. Δ CCT terkecil adalah 0,016 detik pada saat nilai SCES 0,1 pu dan Δ CCT terbesar adalah 0,2439 detik pada saat nilai SCES 1 pu, secara grafik dapat dilihat pada Gambar 4.15. Terdapat selisih perhitungan nilai CCT metode *critical trajectory* dengan TDS pada saat penambahan SCES 0,1 pu, 0,2 pu, 0,3 pu, dan 0,9 pu, namun dapat ditolerir karena nilainya sangat kecil.

Dari Gambar 4.14 yang menunjukkan perbandingan kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) di titik E ketika terjadi penambahan nilai SCES, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru berosilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.

Nilai SCES	Critical Trajectory		Time Domain Simulation		ΔCCT	Error
(pu)	CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	(8)	(8)
0	0,2034	0,4127	0,21-0,22	104,127	0	-0,0066
0,1	0,2194	0,4486	0,22-0,23	104,486	0,0160	-0,0006
0,2	0,2370	0,3768	0,24-0,25	103,768	0,0336	-0,003
0,3	0,2554	0,4458	0,26-0,27	104,458	0,0520	-0,0046
0,4	0,2757	0,3609	0,27-0,28	103,609	0,0723	0
0,5	0,2984	0,4276	0,29-0,30	104,276	0,0950	0
0,6	0,3227	0,3449	0,32-0,33	103,449	0,1193	0
0,7	0,3490	0,3536	0,34-0,35	103,536	0,1456	0
0,8	0,3783	0,3496	0,37-0,38	103,496	0,1749	0
0,9	0,4102	0,3426	0,40-0,41	103,426	0,2068	0,0002
1	0,4473	0,3805	0,44-0,45	103,805	0,2439	0

Tabel 4.6 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT di titik E



Gambar 4.14 Respon ω terhadap δ saat kapasitas SCES 0,9 pu



Gambar 4.15 Perbandingan penambahan kapasitas SCES dengan Δ CCT di titik gangguan E.

4.3 Optimasi Kapasitas SCES pada Sistem

Analisis hasil penambahan kapasitas SCES terhadap nilai CCT ditunjukkan sebagai berikut,

Tabel 4.7 Perbandingan penambahan SCES terhadap nilai CCT tiap titik

 gangguan

Nilai	CCT (s)						
SCES (pu)	Fault A	Fault B	Fault C	Fault D	Fault E		
0	0,2890	0,2085	0,2860	0,2839	0,2034		
0,1	0,3060	0,2245	0,3012	0,2991	0,2194		
0,2	0,3241	0,2416	0,3171	0,3152	0,2370		
0,3	0,3437	0,2602	0,3342	0,3324	0,2554		
0,4	0,3653	0,2727	0,3527	0,3511	0,2757		
0,5	0,3893	0,2931	0,3730	0,3715	0,2984		
0,6	0,4161	0,3174	0,3956	0,3941	0,3227		
0,7	0,4466	0,3467	0,4210	0,4200	0,3490		
0,8	0,4806	0,3842	0,4500	0,4489	0,3783		
0,9	0,5190	0,4247	0,4836	0,4822	0,4102		
1	0,5614	0,4703	0,5228	0,5209	0,4473		

Berdasarkan Tabel 4.7, nilai CCT berbanding lurus dengan penambahan kapasitas SCES sehingga perlu ditambahkan suatu batasan terhadap kondisi ini. Batasan tersebut yaitu dengan mempertimbangkan *setting* proteksi pada sistem. Terdapat dua asumsi kondisi untuk mengetahui kapasitas optimal SCES pada sistem ini, yaitu kondisi pertama dijelaskan sub-bab 4.3.1 sedangkan kondisi kedua dijelaskan pada sub-bab 4.3.2.

4.3.1 Penentuan Kapasitas SCES Kondisi Pertama

Pada kasus ini, penambahan SCES ditentukan dengan mempertimbangkan waktu total operasi dari peralatan pengaman mulai dari relay merasakan gangguan hingga CB terbuka untuk memutus gangguan. Parameter yang dilihat adalah waktu total operasi CB (t_{clearing}). Berdasarkan Tabel 2.1 waktu total operasi CB diperoleh dari persamaan

$$t_{clearing} = t_{set} + t_{error} + t_{CBopen} \tag{4.1}$$

dimana

t _{set}	=	waktu setting relay untuk merasakan gangguan
t _{error}	=	waktu toleransi relay dan error
t _{CBopen}	=	waktu yang diperlukan CB untuk memutus gangguan

Asumsi waktu setting relay adalah 3 *cycle* atau 0,06 detik, waktu toleransi dan *error* adalah 5 *cycle* atau 0,1 detik dan waktu CB *open* adalah 4 *cycle* 0,08 detik sehingga waktu keseluruhan operasi CB adalah

$$t_{clearing} = 0.06s + 0.1s + 0.08s \tag{4.2}$$

$$t_{clearing} = 0,24s \tag{4.3}$$

Tabel 4.7 menunjukkan bahwa nilai CCT terkecil adahal 0,2034 detik yaitu pada saat terjadi gangguan di titik E, sedangkan persamaan (4.3) menunjukkan waktu total operasi CB adalah 0,24 detik, oleh karena itu nilai CCT sistem perlu ditingkatkan diatas 0,24 detik sehingga mampu mengamankan seluruh titik gangguan. Berdasarkan Tabel 4.7 dan Gambar 4.16, nilai SCES yang optimal adalah 0,3 pu. Pemilihan SCES 0,3 pu akan menyebabkan nilai CCT terkecil saat terjadi gangguan meningkat sebesar 0,052 detik menjadi 0,2554 detik sehingga memenuhi persyaratan, yaitu waktu operasi CB masih dibawah nilai CCT sistem.


Gambar 4.16 Grafik kapasitas optimal SCES dengan *t_{clearing}* 0,24 detik.

4.3.2 Penentuan Kapasitas SCES Kondisi Kedua

Pada kasus ini, penambahan SCES ditentukan dengan mempertimbangkan waktu total operasi dari CB mulai dari relay merasakan gangguan hingga CB terbuka untuk memutus gangguan.

Asumsi waktu setting relay adalah 5 *cycle* atau 0,1 detik, waktu toleransi dan *error* adalah 5 *cycle* atau 0,1 detik dan waktu CB *open* 0,08 detik sehingga waktu keseluruhan operasi CB adalah

$$t_{clearing} = 0.1s + 0.1s + 0.08s \tag{4.4}$$

$$t_{clearing} = 0,28s \tag{4.5}$$

Tabel 4.7 menunjukkan bahwa nilai CCT terkecil adalah 0,2034 detik yaitu pada saat terjadi gangguan di titik E, sedangkan persamaan (4.5) menunjukkan waktu total operasi CB adalah 0,28 detik sehingga nilai CCT sistem perlu ditingkatkan diatas 0,28 detik sehingga mampu mengamankan seluruh titik gangguan. Oleh karena itu berdasarkan Tabel 4.7 dan Gambar 4.17 nilai SCES yang optimal adalah 0,5 pu. Pemilihan SCES 0,5 pu akan menyebabkan nilai CCT terkecil saat terjadi gangguan meningkat sebesar 0,095 detik menjadi 0,2984 detik sehingga memenuhi persyaratan, yaitu waktu operasi CB masih dibawah nilai CCT sistem.



Gambar 4.17 Grafik kapasitas optimal SCES dengan *t*_{clearing} 0,28 detik.

BAB 5 KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis kestabilan sistem dengan menggunakan parameter nilai CCT menggunakan metode *critical trajectory* dengan modifikasi *losing synchronism*, kemudian terdapat kondisi sebelum pemasangan SCES dan setelah pemasangan SCES, maka dapat disimpulkan bahwa :

- Pemasangan SCES pada bus generator mampu menjaga kestabilan sistem saat terjadi gangguan, ditunjukkan oleh gambar respon kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor pada bab 4.
- b) Nilai CCT terus meningkat berbanding lurus dengan penambahan kapasitas SCES, sebagai contoh pada titik gangguan A, nilai CCT sebelum pemasangan SCES adalah 0,2890 detik, sedangkan pada saat dilakukan pemasangan SCES, nilai CCT pada saat kapasitas SCES 1 pu adalah 0,5614 detik.
- c) Penentuan kapasitas optimal dengan mempertimbangkan koordinasi proteksi, pada kasus pertama diperoleh *time clearing* peralatan memutus gangguan sebesar 0,24 detik sehingga perlu ditambahkan SCES sebesar 0,3 pu. Pada kasus kedua, diperoleh *time clearing* peralatan memutus gangguan sebesar 0,28 detik sehingga perlu ditambahkan SCES sebesar 0,5 pu.

5.2 Saran

Dari kesimpulan yang telah diberikan, saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut :

- a) Analisis pemasangan SCES terbukti mampu memperbaiki nilai CCT sehingga pemasangan SCES dapat dipertimbangkan untuk digunakan dalam koordinasi proteksi apabila terdapat kondisi yang tidak memungkinkan untuk mengubah *setting* peralatan.
- b) Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pemodelan kontroler dari SCES karena pada tugas akhir ini SCES

dimodelkan secara matematis dan dianggap hanya menyerap daya saat terjadi gangguan.

c) Analisis metode *critical trajectory* dan pemasangan SCES perlu diterapkan pada *plant* selain standar IEEE sehingga dapat dijadikan pembanding dengan penelitian yang sudah ada.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Z. Ariandana, Optimasi Capacitive Energy Storage (CES) Menggunakan Differential Evolution Algorithm (DEA) untuk Kestabilan Transien Multimesin Berdasarkan Fungsi Energi. Surabaya, Indonesia: Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2014.
- [2] T. P. Sari, A. Priyadi, M. Pujiantara, N. Yorino, and M. H. Purnomo, "Improving Transient Stability Assessment by Installing Super Capacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism," in 2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Bali, Indonesia, 2018, pp. 51–55.
- [3] L. L. Grigsby, Power System Stability and Control, Third Edition. 2016.
- [4] "Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions," IEEE Trans. Power Syst., vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, Aug. 2004.
- [5] P. S. Kundur, Power system stability and control, Indian edition. New York: Mc Graw Hill Education (India) Private Limited, 1994.
- [6] J. C. Das, Transients in Electrical Systems. New York, USA: McGraw-Hill Professional Publishing, 2010.
- [7] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, Power system analysis. New York, NY: McGraw Hill, 1994.
- [8] A. Priyadi, "BUKU BAHAN AJAR KESTABILAN TRANSIENT," p. 157.
- [9] J. Miller, "Introduction to electrochemical capacitor technology," IEEE Electr. Insul. Mag., vol. 26, no. 4, pp. 40–47, Jul. 2010.
- [10] "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems," p. 751.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

Respon Generator di titik gangguan A saat nilai SCES 0,2 pu.
Generator 1



➢ Generator 4



Respon Generator di titik gangguan B saat nilai SCES 0,3 pu.
Generator 1





Respon Generator di titik gangguan C saat nilai SCES 0,5 pu.
Generator 1





Respon Generator di titik gangguan D saat nilai SCES 0,7 pu.
Generator 1





Respon Generator di titik gangguan E saat nilai SCES 0,9 pu.
Generator 1





BIODATA PENULIS



Rakaditra Astungkara, lahir di kota Surakarta pada tanggal 6 Juni 1997. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDN 15 Surakarta, SMPN 1 Surakarta dan SMAN 4 Surakarta dan sejak tahun 2015 menempuh pendidikan sebagai mahasiswa bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya. Selama kuliah, penulis aktif sebagai pengurus HIMATEKTRO ITS di bidang Manajemen Sumber

Daya Mahasiswa dan juga sebagai asisten Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga (LIPIST B204). Penulis dapat dihubungi melalui email rakaditraast@gmail.com.