

Perbaikan CCT Pada *Multi Machine Infinite Bus* Dengan *Supercapacitor Energy Storage* Menggunakan *Critical Trajectory*

¹Talitha Puspita Sari, ²Rafin Aqsa Izza Mahendra, ³Ardyono Priyadi, ⁴Vita Lystianingrum, ⁵Margo Pujiantara, ⁶Sjamsjul Anam

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro dan Informatika Cerdas, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

¹talithapuspita@gmail.com, ²rafinaqsa@gmail.com, ³priyadi@ee.its.ac.id, ⁴vita@ee.its.ac.id, ⁵margo@ee.its.ac.id, ⁶anam@ee.its.ac.id

Abstract - Transient stability is an important aspect in maintaining the continuity and reliability of the electrical power system when a sudden large disturbance occurs. However, there is a time operation's limitation of the protection system to eliminate disturbance before the system becomes unstable and loses its synchronization. Critical Clearing Time (CCT) is the toleration time to eliminate the fault to keep the system stable. To improve system stability, installing Supercapacitor Energy Storage (SCES) can be one of the methods for extending the CCT values. SCES absorb large amounts of electricity simultaneously when a fault occurs. This paper proposed a determination of SCES' controller effect in extending the CCT. SCES becomes a dummy load and extends the CCT value depending on the controller's ability to respond to a fault. Controller modeling is applied to SCES, which is installed at the bus generator with determined capacity. The modified Fouad and Anderson 9-bus 3-machine system with a single machine to an infinite bus is used to validate the proposed method. Moreover, the critical trajectory method, which is known as a faster calculation and better accuracy than the time domain simulation method, is used to obtain the CCT value. The result shows that the faster controllers work against fault, the higher the CCT value improvement of system CCT. The highest improvement occurs when the controller works at 0.001s.

Keywords — *Critical Clearing Time, Critical Trajectory, Multi-machine, Supercapacitor Energy Storage, Transient Stability*

Abstrak — Kestabilan transien merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam menjaga kontinuitas dari suatu sistem tenaga listrik apabila terjadi gangguan besar secara tiba-tiba. Namun, terdapat keterbatasan waktu operasi dari suatu sistem proteksi untuk mengisolasi gangguan sebelum sistem menjadi tidak stabil dan lepas sinkronisasi. *Critical Clearing Time* (CCT) adalah batasan waktu yang diperbolehkan untuk mengisolasi suatu gangguan untuk membuat sistem menjadi stabil. Untuk meningkatkan kestabilan sistem, memasang *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) merupakan salah satu metode untuk memperpanjang nilai CCT. SCES dapat menyerap dalam jumlah besar dalam waktu yang cepat ketika terjadi gangguan. Penelitian ini mengusulkan identifikasi dari efek kontrol SCES dalam memperpanjang nilai CCT. SCES seolah-olah menjadi beban sesaat dan memperpanjang nilai CCT bergantung dari kemampuan kontroler dalam merespon gangguan. Pemodelan kontrol diaplikasikan dalam SCES yang terpasang pada salah satu bus generator dengan kapasitas yang telah ditentukan. *Modified Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus*

dengan *single machine to infinite bus* digunakan untuk memvalidasi metode yang disusulkan. Selain itu, metode *critical trajectory* yang mana diketahui memiliki kecepatan hitung yang lebih cepat dan memiliki keakuratan lebih baik dibandingkan metode *Time Domain Simulation* (TDS) digunakan untuk mendapatkan nilai CCT. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan kontrol yang lebih cepat ketika terjadi gangguan, maka nilai CCT pada sistem yang dihasilkan akan menjadi lebih tinggi. Nilai kenaikan tertinggi terjadi ketika kontroler bekerja pada saat 0.001 detik.

Kata Kunci — *Critical Clearing Time, Critical Trajectory, Kestabilan Transien, Multimesin, Supercapacitor Energy Storage, Transient Stability*

I. PENDAHULUAN

Kestabilan merupakan salah satu aspek utama dalam suatu sistem tenaga listrik yang harus diperhatikan apabila ingin menjaga keandalan dan kontinuitas suatu sistem. Kestabilan sistem adalah kemampuan suatu sistem untuk dapat kembali menuju keadaan normal setelah gangguan. Untuk mempelajari lebih lanjut mengenai kestabilan, maka diperlukan suatu analisa kestabilan transien. Analisa kestabilan transien merupakan pedoman dalam mempertimbangkan koordinasi proteksi dari suatu sistem tenaga listrik, sebab dalam analisa kestabilan transien terdapat waktu kritis pemutusan yang diperbolehkan untuk mengisolasi suatu gangguan. Apabila pemutusan melebihi waktu kritis tersebut, maka sistem tidak akan stabil dan kehilangan sinkronisasi. Waktu kritis tersebut disebut dengan *Critical Clearing Time* (CCT). Untuk mencari nilai CCT, digunakan suatu metode yang disebut dengan lintasan kritis atau *critical trajectory*. Metode ini memiliki kelebihan yakni dapat menentukan nilai CCT lebih cepat dan akurat dibandingkan dengan metode lainnya.

CCT memiliki peranan yang sangat penting dalam sistem proteksi sebuah sistem, sehingga perbaikan nilai CCT merupakan hal yang sangat diprioritaskan dalam penelitian yang sudah ada. Salah satu cara untuk memperbaiki CCT suatu sistem adalah dengan menggunakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES). SCES dapat menyerap daya dalam jumlah besar dan waktu yang cepat sehingga diharapkan ketika terjadi hubung singkat, SCES berfungsi sebagai *dummy load* yang diharapkan mampu memperbaiki nilai CCT. Sehingga kestabilan sistem akan meningkat karena memiliki

waktu yang lebih panjang untuk memutus gangguan. Tetapi, dalam penyerapan daya dalam jumlah besar, SCES akan dipengaruhi oleh kontroler dalam melaksanakan tugasnya. Hal ini bergantung terhadap waktu saat kontroler ini mulai bekerja pada saat terjadi gangguan. Dalam penelitian ini, pengaruh kontroler akan mengidentifikasi kinerja SCES dalam perbaikan nilai CCT. Selain itu, akan digunakan sistem *multi-machine* berbasis *single machine to infinite bus* untuk memvalidasi metode yang diusulkan.

II. TEORI PENUNJANG

A. Stabilitas Sistem

Suatu sistem tenaga listrik pada dasarnya beroperasi dalam kondisi yang tidak linier dengan beban dan dapat mengalami perubahan setiap waktunya baik dari daya generator maupun parameter lainnya. Sehingga, kestabilan sistem tenaga listrik merupakan salah satu parameter yang harus diperhatikan dalam menjaga kontinuitas dan reliabilitas dari suatu sistem tenaga. Kestabilan sistem merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik yang memungkinkan untuk berada dalam kondisi seimbang baik pada saat beroperasi secara normal maupun setelah terjadi gangguan[1].

Gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan hal yang tidak dapat dihindari. Sehingga suatu sistem tenaga harus mempersiapkan akan hal ini baik dari gangguan dalam jangka pendek maupun jangka panjang, dengan skala kecil maupun besar. Salah satu contoh dari gangguan kecil adalah perubahan beban yang terjadi secara kontinu sehingga sistem dituntut untuk menyesuaikan perubahan kondisi tersebut agar dapat berfungsi sebagaimana mestinya. Sedangkan gangguan besar merupakan gangguan yang dapat mengakibatkan perubahan yang drastis pada sistem seperti gangguan hubung singkat.

Apabila gangguan hubung singkat tidak segera dihilangkan, maka akan berdampak pada generator yang kehilangan titik kestabilannya. Untuk mempermudah dalam analisa kestabilan pada sistem, maka kestabilan sistem tenaga listrik diklasifikasikan menjadi beberapa jenis kestabilan[2], yaitu kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi, dan kestabilan sudut rotor.

Kestabilan sudut rotor tidak akan pernah lepas kaitannya dengan interkoneksi generator dalam suatu sistem tenaga untuk mempertahankan kondisi sinkronisasinya setelah mengalami gangguan. Kunci utama dari kestabilan sudut rotor ini adalah kemampuan sistem untuk menjaga keseimbangan antara torsi mekanik dan torsi listrik dari masing masing generator. Apabila torsi mekanik lebih besar dibanding daripada torsi listrik, maka rotor akan mengalami percepatan sedangkan apabila torsi listrik lebih besar dari pada torsi mekanis maka rotor akan mengalami perlambatan[1].

Percepatan atau perlambatan tersebut akan menimbulkan perbedaan sudut rotor dan dapat mengakibatkan generator kehilangan sinkronisasinya. Kestabilan sudut rotor dibagi menjadi dua, yaitu kestabilan sudut rotor akibat gangguan

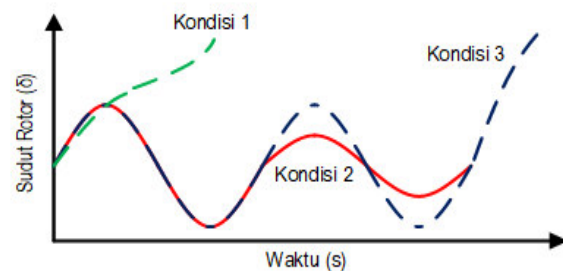
kecil seperti perubahan beban yang fluktuatif dan kestabilan sudut rotor akibat gangguan besar akibat dari gangguan hubung singkat dan lepasnya generator[1].

B. Kestabilan Transien

Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga untuk menjaga sinkronisasinya ketika dihadapkan dengan gangguan dalam periode ayunan pertama. Pada periode ini, generator dihadapkan dengan perubahan daya output yang menyebabkan rotor berakselerasi untuk menjaga sistem dari kehilangan sinkronisasinya[3]. Pada periode ini, baik kendali governor maupun pengatur tegangan otomatis diasumsikan belum bekerja. Berikut ini merupakan faktor utama yang memengaruhi kinerja sistem pada saat transien[3]:

- Pengaruh gangguan terhadap sistem berdasarkan jenis gangguan, lokasi gangguan, dan durasi gangguan tersebut.
- Kemampuan sistem transmisi untuk menjaga kemampuan sinkronisasinya selama periode transien akibat gangguan.

Gambar 1 merupakan ilustrasi mengenai karakteristik dari generator, yang terdiri dari respon sudut rotor pada saat memiliki kondisi stabil dan dua kasus lainnya pada saat kondisi tidak stabil.



Gambar 1. Respon sudut rotor pada saat gangguan[4]

- Kondisi 1, sudut rotor meningkat tidak terkendali sehingga sistem kehilangan sinkronisasinya dan menjadi tidak stabil. Kondisi ini disebut juga sebagai *first swing instability*.
- Kondisi 2, sudut rotor sempat mengalami kenaikan tetapi kemudian kembali menurun untuk mempertahankan sinkronisasinya.
- Kondisi 3, sistem stabil pada ayunan pertama, namun sistem menjadi tidak stabil akibat dari osilasi yang meningkat hingga kondisi akhir.

C. Critical Clearing Time

Critical Clearing Time (CCT) merupakan waktu pemutusan maksimum yang digunakan suatu sistem proteksi untuk mengisolasi gangguan yang terjadi. Gangguan pada

sistem tenaga listrik dapat dihilangkan dengan cara mengisolasi titik gangguan menggunakan *circuit breaker*.

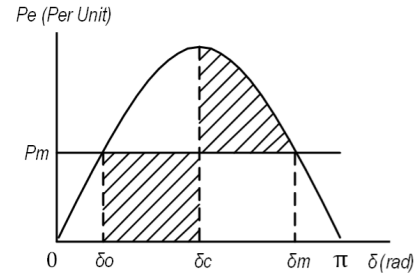
Gambar 2 menunjukkan kurva antara daya dengan sudut rotor ketika terjadi gangguan hubung singkat pada sistem. Pada saat gangguan terjadi δ_0 , daya elektrik (P_e) akan menurun sehingga nilai daya mekanis (P_m) lebih besar dari P_e . Rotor mengalami percepatan, frekuensi sistem meningkat dan sudut rotor bertambah. Kemudian P_m akan berusaha untuk mengimbangi P_e dan gangguan tersebut perlu dihilangkan sebelum sudut rotor mencapai titik δ_c . Sehingga saat gangguan dihilangkan, kondisi P_e akan lebih besar daripada P_m dan akan mengalami perlambatan tetapi tidak sampai melewati δ_m . Maka sistem akan kembali menyeimbangkan kedua daya tersebut dengan meningkatkan daya mekanis untuk mencapai kestabilan[5]. δ_r kemudian dikonversi menjadi waktu kritis dimana gangguan harus dihilangkan sehingga sistem mampu kembali kepada keadaan yang stabil. Waktu kritis tersebut dinamakan CCT yang merupakan batas waktu peralatan beroperasi untuk mengamankan gangguan.

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 dapat menyebabkan *blackout*. Nilai CCT dapat diperoleh berdasarkan gangguan terbesar yang dialami sistem yaitu hubung singkat tiga fasa. Nilai CCT perlu dipertimbangkan dalam pertimbangan menganalisa koordinasi proteksi untuk menjaga kestabilan pada sistem tenaga.

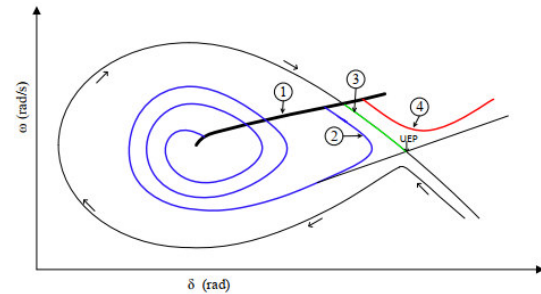
D. Critical Trajectory

Dalam menentukan nilai CCT dapat digunakan metode *critical trajectory*. *Critical trajectory* merupakan suatu lintasan yang dimulai dari titik pertama gangguan hingga mencapai titik kritisnya dimana sistem kehilangan sinkronisasinya[6]. Kelebihan dari metode ini dibandingkan dengan metode yang lainnya adalah kecepatan dan akurasi untuk mendapatkan nilai CCT secara langsung[7].

Gambar menggambarkan prinsip kerja metode *critical trajectory*, dimana terdapat empat parameter lintasan dalam grafik kecepatan sudut rotor terhadap waktu. Lintasan 1 menunjukkan lintasan pada saat terjadinya gangguan yang dimulai dari *Stable Equilibrium Point* (SEP), Lintasan 2 merepresentasikan ketika gangguan tersebut dihilangkan sebelum nilai CCT nya sehingga sistem dapat dikatakan stabil dan akan berputar mengelilingi *stable equilibrium point*. Lalu lintasan 3 menunjukkan lintasan kritis pemutusan gangguan, dan yang terakhir adalah lintasan 4 yang menggambarkan kondisi yang tidak stabil akibat gangguan yang terlambat dihilangkan dari sistem sehingga membuat sistem menjadi tidak stabil[6].



Gambar 2. Kurva daya vs. sudut rotor [4]



Gambar 3. Ilustrasi *critical trajectory*[4]

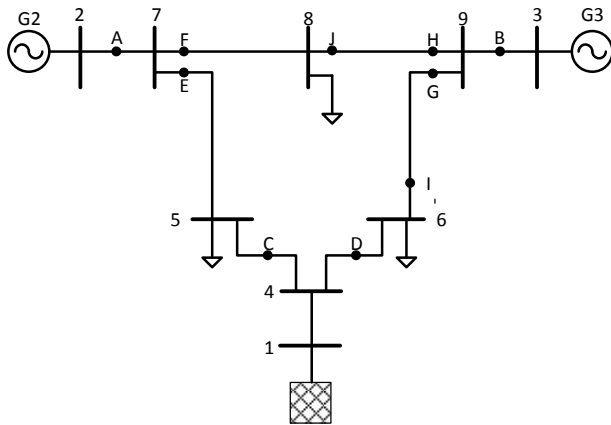
E. Supercapacitor Energy Storage

Supercapacitor Energy Storage (SCES) merupakan salah satu teknologi penyimpanan energi yang terdiri dari kapasitor yang dihubungkan secara paralel dan resistor yang dihubungkan paralel terhadap kapasitor[6]. SCES merupakan peralatan elektronik yang mampu menyimpan dan mengeluarkan daya dalam intensitas yang tinggi dalam waktu yang cepat. SCES memiliki *life cycle* yang lebih panjang serta mampu melakukan *charging* dan *discharging* secara cepat dengan *power density* yang tinggi apabila dibandingkan dengan *energy storage* yang lain seperti *fuel cell* dan baterai [8]. SCES berfungsi sebagai pengganti beban secara sesaat, sehingga sistem memiliki waktu yang lebih lama untuk menjaga kestabilannya sampai peralatan pengaman bekerja. SCES mampu digunakan untuk memperbaiki nilai CCT dengan rata-rata waktu 0,0143 detik pada sistem IEEE 3-machine 9-bus [7].

Untuk memperbaiki nilai CCT, SCES diharapkan dapat bekerja secara optimal pada saat periode transien, yaitu 0 hingga 0.5 *cycle*. Sehingga dibutuhkan sebuah kontrol yang tepat agar SCES dapat bekerja sesuai dengan waktu yang dibutuhkan.

III. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, digunakan sistem modifikasi sistem 3 mesin 9 bus Fouad Anderson, dimana salah satu generator terbesar akan diubah menjadi sebuah *infinite bus*. *Single Line Diagram* sistem ditunjukkan pada Gambar 4. Dengan menggunakan *Critical Trajectory*, nilai CCT akan didapatkan pada masing-masing titik gangguan yang telah ditentukan.



Gambar 4. Single Line Diagram modifikasi 3 Mesin Fouad dan Anderson

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

A. Pemodelan Kondisi Sistem

Dalam menggambarkan metode lintasan kritis untuk menganalisis kestabilan transien dapat diwakili oleh tiga kondisi yaitu kondisi sebelum gangguan, kondisi selama gangguan, dan kondisi setelah gangguan. Pada saat awal kondisi, sistem tenaga akan beroperasi pada titik stabil (X_{pre}). Kemudian, ketika gangguan terjadi pada saat $t=0$ hingga $t=\tau$ sistem akan berubah secara dinamis selama periode gangguan $[0, \tau]$ yang ditunjukkan dalam persamaan berikut[9]:

$$\dot{x} = f_F(x), \quad 0 \leq t \leq \tau, \quad x(0) = x_{pre} \quad (1)$$

dimana $x \in R^N, t \in R, f_F: R^N \rightarrow R^N$

Lintasan pada saat terjadi gangguan (*Fault on Trajectory*) dirumuskan sebagai berikut:

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), \quad 0 \leq t \leq \tau \quad (2)$$

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

Pada saat gangguan hilang atau $t=\tau$, sistem dijelaskan secara dinamis dengan persamaan berikut:

$$\dot{x} = f(x), \quad \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (3)$$

Sehingga lintasan pasca gangguan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$x(t) = X(t; x^0), \quad \tau \leq t \leq \infty; X(t; x^0): R^N \rightarrow R^N \quad (4)$$

Dengan asumsi bahwa x^0 merupakan titik awal atau titik pada saat terjadi gangguan pada waktu τ , maka dapat disederhanakan menjadi:

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (5)$$

Pada saat t^k dinotasikan menjadi x^k , maka persamaan berikutnya akan berhubungan dengan rumus *trapezoidal* konvensional yaitu:

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2} (x^{k+1} + x^k) (t^{k+1} - t^k) \quad (6)$$

dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (7)$$

Dalam memperoleh lintasan kritis seringkali didapatkan kesulitan dimana lintasan kritis mencapai *Unstable Equilibrium Point* pada waktu yang tak terhingga. Untuk menghindari masalah ini, maka jarak diantara dua titik didefinisikan sebagai:

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |x^{k+1} + x^k| (t^{k+1} - t^k) \quad (8)$$

Sehingga domain waktu dapat digantikan dengan jarak dan disubstitusikan kembali dan dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \varepsilon = 0 \quad (9)$$

Transformasi waktu menjadi jarak digunakan untuk menjelaskan lintasan kritis menjadi titik terbatas dengan jarak yang sama. Kondisi kritis dari kestabilan transien dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$x^0, \dots, x^{m-1}, \varepsilon, \tau, k_s, v \left\{ \sum_{k=0}^{m-1} (\mu^k)' (\mu^k) + (\mu^{m-1})' W (\mu^{m-1}) \right\} \quad (10)$$

dimana $x^0 \in R^N, \varepsilon \in R, \tau \in R, k_s \in R, v \in R^{N_{gen}}$

$$\mu^k = x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \varepsilon \quad (11)$$

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (12)$$

dengan kondisi batasan

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (13) \quad .51$$

$$\mu^{m+1} = \left[\frac{\partial P^{m+1}}{\partial \theta^{m+1}} \cdot \theta \right] \quad (14)$$

Modified Losing Synchronism sedangkan untuk penyelesaian masalah minimalisasi pada persamaan (10) dapat diselesaikan dengan metode konvensional untuk memperoleh nilai CCT.

B. Pemodelan Kontroler Supercapacitor Energy Storage

Pada penelitian kali ini, SCES hanya dapat menyerap kelebihan daya pada saat terjadi gangguan. SCES diasumsikan selalu berada dalam kondisi kosong, sehingga dapat bekerja sewaktu terjadi gangguan. Namun, terdapat parameter lain yang mempengaruhi kinerja SCES dalam analisa kestabilan transien yaitu waktu kerja perangkat setelah terjadi gangguan. Dalam analisa kestabilan transien, waktu kerja tersebut akan memengaruhi nilai CCT.

SCES dipasang pada salah satu bus generator sistem dengan kapasitas sebesar 1 p.u. Sedangkan nilai dari daya yang terserap (P_{scs}) akan bergantung pada waktu kerja kontroler yang dimodelkan secara matematis dalam persamaan berikut[10]:

$$(P + V) \frac{K}{sT_c + 1} = P_c \quad (16)$$

Pada penelitian kali ini, diagram kontrol penguatan disederhanakan dalam bentuk K akan diasumsikan bernilai satu. T_c merupakan waktu saat SCES mulai bekerja. Pemilihan waktu yang digunakan adalah pada detik ke 0.1; 0.01; dan 0.001. Hal ini didasari kemampuan kerja governor pada detik ke 0.1, kemudian AVR pada detik ke 0.01, dan SCES dapat bekerja di detik ke 0.001[11]. Kemudian persamaan P_{scs} tersebut akan dimodelkan secara matematis melalui persamaan ayunan berikut[7]:

$$M\dot{\omega} = P_m - P_e - P_{SCES} \quad (17)$$

dimana:

M = momen inersia

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

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

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dilakukan pembahasan mengenai hasil simulasi. Terdapat dua perbandingan kondisi, yaitu sebelum dan sesudah penambahan SCES beserta kontroler. Diasumsikan bahwa terjadi gangguan pada saluran transmisi yang terdiri dari saluran ganda. Kemudian gangguan dihilangkan dengan membuka saluran yang mengalami gangguan. Simulasi dilakukan pada sistem dengan 10 titik gangguan sehingga dapat terlihat pengaruh kontroler pada SCES dalam peningkatan nilai CCT.

A. Analisis Nilai CCT tanpa Penambahan SCES

Tabel 1 merupakan hasil simulasi nilai CCT tanpa penambahan SCES pada sistem. Sebagai contoh, ketika terjadi gangguan di titik C, rentang CCT yang dihasilkan metode *Time Domain Simulation* (TDS) adalah 0.25-0.26. Ketika gangguan dihilangkan sebelum 0.25 detik, maka sistem tersebut akan kembali stabil. Namun apabila gangguan dihilangkan lebih dari 0.26 detik, maka sistem tidak akan stabil. Dengan metode *Critical Trajectory*, diperoleh CCT sebesar 0.2525 detik. Error dari metode tersebut didapatkan ketika nilai CCT berada diluar dari rentang waktu metode TDS. Misalnya terjadi error pada titik gangguan F dan H. Namun, kedua error tersebut dikatakan baik karena memiliki nilai error yang sangat kecil.

B. Analisis Nilai CCT Pemodelan SCES dan Kontroler

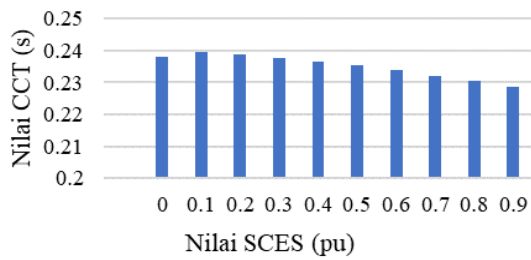
Dari hasil simulasi pada Tabel 2, semakin cepat waktu kontroler bekerja akan menyebabkan penyerapan SCES menjadi maksimal dan nilai CCT akan semakin baik. Akan tetapi hasil CCT yang diperoleh pada titik gangguan B, G dan H mengalami penurunan pada titik tertentu.

Tabel 1. Perbandingan nilai CCT tanpa SCES

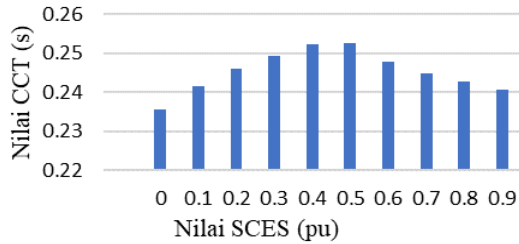
| Lokasi | Metode TDS (s) | Metode Critical Trajectory (s) | Error (s) |
|--------|----------------|--------------------------------|-----------|
| A | 0.18-0.19 | 0.1816 | 0 |
| B | 0.23-0.24 | 0.2379 | 0 |
| C | 0.25-0.26 | 0.2525 | 0 |
| D | 0.25-0.26 | 0.2567 | 0 |
| E | 0.19-0.2 | 0.1985 | 0 |
| F | 0.2-0.21 | 0.1986 | -0.0014 |
| G | 0.23-0.24 | 0.2356 | 0 |
| H | 0.23-0.24 | 0.2401 | +0.0001 |
| I | 0.41-0.42 | 0.4166 | 0 |
| J | 0.28-0.29 | 0.2785 | 0 |

Tabel 2. Perbandingan nilai CCT dengan SCES

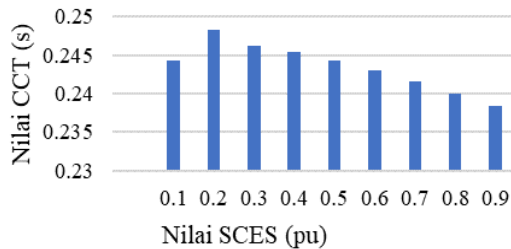
| Lokasi | CCT (s) | | | |
|--------|-----------|------------|------------|-------------|
| | Eksisting | Tc = 0,1 s | Tc = 0.01s | Tc = 0.001s |
| A | 0.1816 | 0.1833 | 0.1984 | 0.4329 |
| B | 0.2379 | 0.2383 | 0.2395 | 0.2267 |
| C | 0.2525 | 0.2542 | 0.2702 | 0.5275 |
| D | 0.2567 | 0.2582 | 0.2739 | 0.527 |
| E | 0.1985 | 0.2149 | 0.2269 | 0.4490 |
| F | 0.1986 | 0.1999 | 0.2123 | 0.4491 |
| G | 0.2356 | 0.2362 | 0.2416 | 0.2383 |
| H | 0.2356 | 0.2398 | 0.2443 | 0.2364 |
| I | 0.4166 | 0.421 | 0.4638 | 2.2487 |
| J | 0.2785 | 0.28 | 0.294 | 0.4755 |



Gambar 5. Nilai SCES vs. CCT pada titik B



Gambar 6. Nilai SCES vs. CCT pada titik G



Gambar 7. Nilai SCES vs. CCT pada titik H

Gambar 5-7 merupakan hasil dari analisis CCT pada titik B, G, dan H. Berdasarkan hasil simulasi pada ketiga titik tersebut, terlihat ketiga titik tersebut memiliki titik saturasi yang berbeda. Titik B memiliki titik saturasi pada saat SCES memiliki kemampuan penyerapan sebesar 0.1 pu, titik G memiliki titik saturasi pada saat SCES bernilai 0.5 pu, dan titik H memiliki titik saturasi pada saat SCES bernilai sebesar 0.2 pu. Sehingga kapasitas optimal pemasangan nilai SCES adalah sebesar 0.1 pu karena akan terjadi penurunan nilai CCT apabila pemasangan SCES melebihi nilai tersebut.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis data yang telah dilakukan dengan membandingkan pengaruh kontroler SCES pada perbaikan nilai CCT pada sistem, terdapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemasangan SCES dan kontroler pada sistem dapat menjaga kestabilan sistem ketika terjadi gangguan. Hal

ini ditunjukkan oleh respon kecepatan sudut rotor terhadap sudut rotor yang selalu menunjukkan kondisi stabil.

2. Nilai CCT terus meningkat berbanding lurus terhadap kemampuan kontroler dalam merespon gangguan. Semakin cepat kontroler dapat bekerja merespon gangguan maka nilai CCT yang diperoleh menjadi semakin optimal.
3. Peningkatan nilai CCT terbesar terjadi pada saat terjadi gangguan di titik I disertai dengan respon kontroler yang cepat yakni 0.001 detik sehingga perbaikan nilai CCT yang diperoleh sebesar 2.2487 detik.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-Hill, 1994.
- [2] P. Kundur *et al.*, "Definition and classification of power system stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [3] P. M. (Paul M. . Anderson, A. A. (Abdel-A. A. . Fouad, and Institute of Electrical and Electronics Engineers., *Power system control and stability*. IEEE Press, 2003.
- [4] T. P. Sari, R. Astungkara, A. Priyadi, and V. Lystianingrum, "Pengaruh Penambahan SCES terhadap Critical Clearing Time dengan Metode Critical Trajectory", *SinarFe7*, vol. 2, no. 1, pp. 225–230, Jul. 2019.
- [5] H. Saadat, "Power-System-Analysis-by-Hadi-Saadat-Electrical-Engineering-libre.pdf," *Power System Analysis*. pp. 257–313, 1999.
- [6] A. Priyadi *et al.*, "Critical trajectory method for transient stability analysis," *Proc. 2008 Int. Conf. Comput. Electr. Eng. ICCEE 2008*, pp. 291–295, 2008.
- [7] 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," *Proceeding - 2018 Int. Semin. Intell. Technol. Its Appl. ISITIA 2018*, pp. 51–55, 2019.
- [8] A. Fawzy and A. Eessaa, *Review on Supercapacitor Based on Nonomaterials for Energy Storage*. 2017.
- [9] A. Priyadi, M. H. Purnomo, M. Pujiantara, and N. Yorino, *Buku Bahan Ajar Kestabilan Transien*. 2017.
- [10] M. Krpan and I. Kuzle, "Accurate Model of a Supercapacitor Bank for Power System Dynamics Studies," pp. 1–9, 2019.
- [11] Federico Milano, *Power System Modelling and Scripting*. Spain: Springer-Verlag, 2010.