

Perbaikan Nilai CCT Menggunakan SCES Berdasarkan *Critical Trajectory* Dalam Sistem Multimesin Dengan *Damping*

¹ Ardyono Priyadi, ² Risqiya Maulana, ³ Talitha Puspita Sari, ⁴ Vita Lystianingrum, ⁵ Margo Pujiantara, ⁶ Sjamsjul Anam

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

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

Abstract – Stability is an important aspect of the electrical system. When a fault occurs, the electrical system must be secured by the protection system. Power system stability analysis is also needed to secure the system. Critical Clearing Time (CCT) is the maximum time for the protection system to isolate the fault before it loses its synchronism. The system can back to the stable condition when the fault is isolated before the CCT value. One of the methods to enhance the power system stability is extending the CCT. Supercapacitor Energy Storage (SCES) and damper winding can be used to extend the CCT. Damper winding damps the oscillation when a fault occurs in the system. SCES is a device able to store and release energy simultaneously. Moreover, the critical trajectory method is used to calculate the CCT. Furthermore, IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus is used to validate the proposed method. Simulation result shows that the stability system is increasing by using SCES and damping in the test system.

Keywords — *Critical Clearing Time, Critical Trajectory, Damper Winding, Supercapacitor Energy Storage, Transient Stability*

Abstrak — Kestabilan adalah salah satu aspek penting dalam sistem kelistrikan. Ketika terjadi gangguan, sistem kelistrikan harus diamankan oleh sistem pengaman. Analisa kestabilan sistem tenaga juga diperlukan dalam mengamankan sistem. *Critical Clearing Time* (CCT) adalah waktu maksimum bagi sistem pengaman untuk mengisolasi gangguan sebelum hilang sinkron. Sistem dapat kembali ke kondisi stabil ketika gangguan diisolasi sebelum nilai CCT. Salah satu metode untuk meningkatkan stabilitas sistem tenaga adalah meningkatkan nilai CCT. *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dan *damper winding* dapat digunakan untuk memperpanjang nilai CCT. *Damper winding* akan meredam osilasi saat terjadi gangguan pada sistem. Sedangkan SCES adalah perangkat yang mampu menyimpan dan melepaskan energi secara cepat. Selain itu, metode *critical trajectory* digunakan untuk menghitung CCT. Selanjutnya, IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus digunakan untuk memvalidasi metode yang diusulkan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem stabilitas meningkat dengan menggunakan SCES dan damping dalam sistem.

Kata Kunci — *Critical Clearing Time, Critical Trajectory, Damper Winding, Kestabilan Transien, Supercapacitor Energy Storage*

I. PENDAHULUAN

Dalam menjaga kontinuitas dan keandalan sistem tenaga, kestabilan merupakan salah satu aspek listrik yang penting dan harus diperhatikan. Ketika sistem mengalami gangguan, perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk memastikan bahwa sistem bisa mempertahankan keadaan sinkronnya setelah terjadi gangguan. Hubung singkat tiga fasa merupakan salah satu yang harus segera diatasi untuk mengatasi hilangnya sinkronisasi pada sistem agar sistem tetap stabil. Untuk menjaga sistem tetap stabil, gangguan harus segera dihilangkan dengan mempertimbangkan *Critical Clearing Time* (CCT). CCT merupakan waktu maksimal pemutusan yang diperbolehkan untuk mengisolasi gangguan agar sistem kembali stabil. Jika waktu pemutusan gangguan melebihi nilai CCT, maka sistem tadi menjadi tidak stabil.

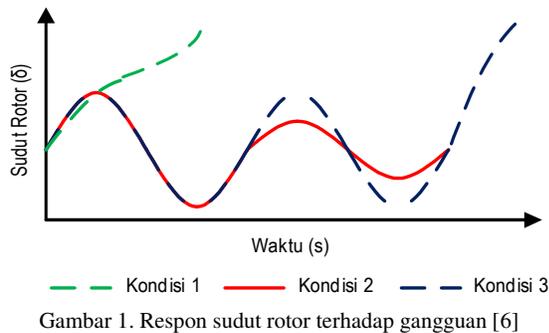
Nilai CCT bisa didapatkan menggunakan beberapa metode seperti; *Energy Function, Time Domain Simulation* (TDS), dan *Critical Trajectory*. Metode *Critical Trajectory* adalah salah satu metode langsung yang dapat menghasilkan nilai CCT secara akurat. *Critical Trajectory* didefinisikan sebagai suatu lintasan yang dimulai dari titik saat gangguan terjadi hingga mencapai suatu titik kritis di mana sistem kehilangan sinkron[1].

Supercapacitor Energy Storage (SCES) adalah teknologi penyimpanan energi khususnya energi listrik yang berkapasitas sangat besar. SCES memiliki kerapatan daya yang lebih tinggi daripada kapasitor konvensional [2]. SCES mampu menyimpan dan melepaskan energi secara cepat dengan kapasitas yang sangat besar. Beberapa penelitian memvalidasi bahwa SCES dapat memperbaiki kestabilan transien dengan cara meningkatkan nilai CCT [3], [4].

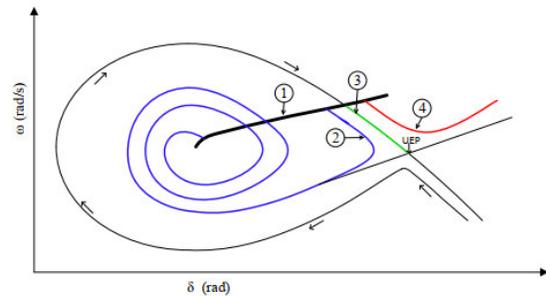
II. URAIAN PENELITIAN

A. Kestabilan Transien

Terputusnya aliran dari generator ke sistem akibat hubung singkat dan fenomena *starting motor* dapat mengakibatkan perubahan daya yang cukup dinamis dan mendadak. Oleh sebab itu, sistem dapat mengalami kegagalan untuk mempertahankan kestabilan transiennya. Kestabilan transien adalah kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan ataupun sinkronisasinya saat terjadi gangguan secara tiba-tiba selama sekitar satu ayunan ketika AVR dan governor belum bekerja[5].



Gambar 1. Respon sudut rotor terhadap gangguan [6]



Gambar 2. Ilustrasi metode *critical trajectory*

Saat sistem dalam keadaan stabil, makan torsi mekanik akan memiliki nilai yang sama dengan torsi elektromagnetik. Perbedaan antara torsi mekanik dan torsi elektromagnetik akan mengakibatkan percepatan atau perlambatan rotor mesin sinkron[6]. Apabila terjadi percepatan putaran rotor, sudut rotor akan menjadi lebih besar. Saat terjadi perlambatan, maka sudut rotor akan menjadi kecil. Sistem akan kembali stabil yang ditunjukkan dengan menurunnya osilasi akibat gangguan.

Gambar 1 merupakan respon sudut rotor terhadap gangguan[6]. Terdapat tiga kondisi yang menunjukkan kondisi stabil dan tidak stabil, yaitu kondisi 1, kondisi 2, dan kondisi 3. Kondisi 1 menunjukkan sudut rotor meningkat hingga sistem lepas sinkron. Kondisi 2 menunjukkan bahwa sistem kembali stabil ketika gangguan dihilangkan. Sedangkan pada kondisi 3 sistem yang pada awalnya stabil menjadi tidak stabil setelah terjadi beberapa ayunan.

B. *Critical Clearing Time dan Critical Trajectory*

Critical Clearing Time (CCT) adalah waktu batas operasi suatu sistem proteksi untuk mengisolasi gangguan sebelum terjadinya hilang sinkron[7]. Jika waktu pemutusan dilakukan sebelum CCT, maka sistem akan stabil. Namun apabila sistem diputus sesudah CCT, maka generator menjadi lepas sinkron dan sistem menjadi tidak stabil.

Critical Trajectory merupakan salah satu metode dalam menghitung nilai CCT. *Critical Trajectory* adalah lintasan yang dimulai dari titik *fault-on trajectory* pada CCT dan mencapai titik kritis yang terjadi kehilangan sinkronisasi [1].

Gambar 2 merupakan ilustrasi dari metode *critical trajectory*. Lintasan 1 adalah lintasan saat terjadi gangguan yang dimulai dari *Stable Equilibrium Point* hingga gangguan diputus. Lintasan 2 adalah lintasan saat dimana sistem sudah mencapai kestabilan karena gangguan dihilangkan sebelum CCT. Lintasan 4 adalah saat sistem tidak stabil, dimana waktu pemutusan melebihi nilai CCT. Sedangkan lintasan 3 merupakan lintasan kritis kestabilan sistem.

C. *Supercapacitor Energy Storage*

Supercapacitor Energy Storage (SCES) merupakan suatu alat penyimpan energi yang memiliki kapasitas yang besar, kepadatan energi tinggi, pengisian dan pengosongan yang sangat cepat dibandingkan dengan kapasitor maupun peralatan penyimpan energi konvensional lainnya[8]. SCES dapat digunakan sebagai salah satu metode untuk memperbaiki kestabilan sistem dikarenakan SCES memiliki respon yang lebih cepat dibandingkan *FACTS device* lainnya. Pada penelitian ini, SCES akan meredam osilasi ketika terjadi gangguan tiga fasa[3],[4].

D. *Damper Winding*

Osilasi pada generator akan menyebabkan rugi-rugi daya yang besar. Maka dari itu, dengan adanya belitan tambahan untuk merapatkan fluks pada generator diharapkan dapat mengurangi osilasi yang muncul saat terjadi gangguan pada sistem.

Belitan generator yang memiliki *damper winding* memiliki arus yang lebih baik dibandingkan dengan belitan yang tidak memiliki belitan peredam[8]. Maka dari itu, *damper winding* digunakan untuk meredam osilasi pada rotor ketika terjadi gangguan. Sehingga dengan penambahan *damper winding* bisa menjadi salah satu solusi untuk memperbaiki kestabilan sistem selain menambahkan SCES.

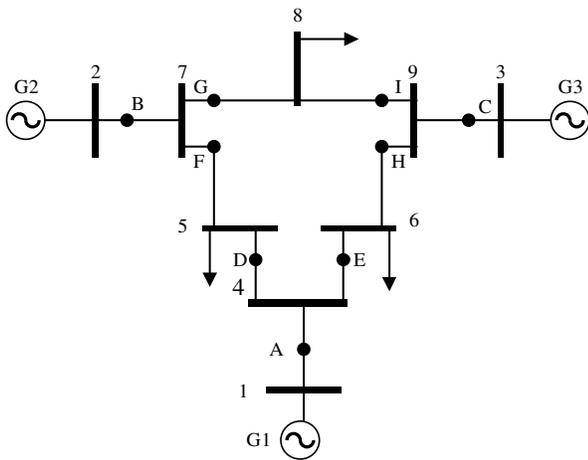
III. PEMODELAN SISTEM

A. *Data Sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus*

Pada penelitian ini, diasumsikan bahwa setiap saluran transmisi terdiri atas saluran ganda. Terdapat 9 lokasi titik gangguan yang berupa gangguan tiga fasa (seimbang) pada salah satu titik yang letaknya dekat dengan bus. Gambar 3 merupakan ilustrasi *Single Line Diagram* sistem IEEE Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus.

B. *Supercapacitor Energy Storage*

Ketika sistem mengalami gangguan tiga fasa, osilasi ayunan pertama akan bernilai sangat besar dan dapat menyebabkan peningkatan nilai sudut rotor generator. Sehingga sistem berpotensi kehilangan sinkron. Pemasangan SCES dalam sistem dapat meredam osilasi akibat gangguan tersebut. Pada penelitian ini, SCES diatur dengan algoritma khusus dengan kontrol parameter waktu yang akan memengaruhi kerja SCES (T_c). Waktu kerja SCES tersebut akan memengaruhi nilai CCT yang dihasilkan.



Gambar 3. Sistem Fouad-Anderson 3 Generator-9 Bus

Dalam penelitian ini, SCES diasumsikan terpasang di bus generator secara paralel dan dengan kapasitas 1 p.u. Sedangkan nilai daya SCES akan bergantung dari waktu kerja dari kontrol SCES seperti persamaan berikut[9]:

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

Kemudian dengan persamaan (1) disubstitusikan ke dalam persamaan ayunan:

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - M_i \omega_i - P_{sces} \quad (2)$$

$$M_i \ddot{\omega}_i - P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - P_{sces} \quad (3)$$

Apabila sistem memiliki koefisien *damping*, maka persamaan menjadi:

$$M_i \ddot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} - P_{sces} - D_i (\dot{\omega}_i) \quad (4)$$

keterangan:

- M_i : Momen inersia generator ke-i
- M_T : Momen inersia total
- ω_i : Kecepatan sudut rotor generator ke-i
- P_{mi} : Daya mekanik generator ke-i
- P_{ei} : Daya elektrik generator ke-i
- θ_i : Penyimpangan sudut rotor generator ke-i
- D_i : Koefisien *damping* generator ke-i

IV. SIMULASI DAN HASIL ANALISIS DATA

Simulasi dilakukan untuk mendapatkan nilai CCT sistem pada saat sebelum pemasangan SCES dan sesudah pemasangan SCES. Pada penelitian ini akan dilakukan komparasi antara sistem tanpa dan dengan *damping*. Selain

itu, terdapat kontrol waktu keluaran SCES untuk bekerja. Kapasitas SCES yang digunakan pada simulasi adalah sebesar 1 p.u. SCES dan diletakkan pada bus generator 2[10].

A. Perhitungan Nilai CCT Sebelum Penambahan SCES

Nilai CCT dengan menggunakan metode *critical trajectory* akan dibandingkan dengan nilai CCT dari metode *Time Domain Simulation* (TDS). Tabel 1 dan Tabel 2 merupakan hasil simulasi CCT sistem sebelum penambahan SCES. Terdapat error antara metode *critical trajectory* dan metode TDS sebesar 0.06% pada Tabel 2. Maka dari itu metode *critical trajectory* dapat digunakan untuk menghitung CCT karena memiliki toleransi error yang rendah.

Tabel 1 merupakan hasil simulasi nilai CCT sistem tanpa *damping*. Sedangkan Tabel 2 merupakan hasil simulasi nilai CCT sistem dengan *damping* sebesar 5%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem dengan *damping* memiliki nilai CCT sistem lebih baik dibandingkan sistem tanpa *damping*.

B. Perhitungan Nilai CCT Setelah Penambahan SCES

Simulasi dilakukan dengan cara mengatur waktu keluaran (T_c) dari SCES, yaitu sebesar 0.01 detik dan 0.005 detik. Tabel 3 dan Tabel 4 merupakan hasil simulasi dengan $T_c=0.01$ detik, sedangkan Tabel 5 dan Tabel 6 adalah hasil simulasi dengan $T_c=0.005$ detik. Selain itu, pada masing-masing T_c akan dilakukan perbandingan sistem tanpa *damping* dan sistem dengan *damping* sebesar 5%.

Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem dengan menggunakan SCES memiliki nilai CCT lebih baik daripada sistem tanpa menggunakan SCES. Misal pada titik gangguan A, sistem tanpa SCES memiliki CCT sebesar 0.3425 detik. Sedangkan sistem dengan SCES memiliki CCT sebesar 0.3670 detik. Begitu pula dengan sistem dengan *damping*. Pada titik gangguan A, sistem tanpa SCES memiliki CCT sebesar 0.4069 detik. Sedangkan sistem dengan SCES memiliki CCT sebesar 0.4382 detik.

Tabel 1. Hasil Perhitungan CCT Sebelum Penambahan SCES dengan Damping 0%

Fault	TDS	critical trajectory	error
A	0.34-0.35	0.3425	0
B	0.21-0.22	0.2131	0
C	0.24-0.25	0.2463	0
D	0.32-0.33	0.3261	0
E	0.32-0.33	0.3256	0
F	0.22-0.23	0.2274	0
G	0.23-0.24	0.2321	0
H	0.25-0.26	0.2579	0
I	0.26-0.27	0.2612	0

Selain itu, dengan adanya damping pada sistem, maka nilai CCT akan menjadi semakin tinggi. Pada Tabel 3 disebutkan bahwa nilai CCT tanpa damping adalah sebesar 0.2289 detik pada titik gangguan B. Sedangkan nilai CCT dengan damping pada Tabel 4 pada titik gangguan B adalah sebesar 0.2616 detik. Maka dapat disimpulkan bahwa dengan adanya damping maka kestabilan sistem akan menjadi lebih baik.

Tabel 5 menunjukkan bahwa sistem dengan respon SCES lebih cepat memiliki nilai CCT lebih baik daripada sistem dengan respon lebih lambat. Misal pada titik gangguan A, sistem dengan respon lebih lambat memiliki CCT sebesar 0.3670 detik. Sedangkan sistem dengan respon SCES lebih cepat memiliki CCT sebesar 0.3943 detik. Begitu pula pada sistem dengan *damping*. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 6, bahwa nilai CCT dengan *damping* dan respon SCES lebih cepat akan lebih baik.

Tabel 2. Hasil Perhitungan CCT Sebelum Penambahan SCES dengan Damping 5%

Fault	TDS	critical trajectory	error
A	0.40-0.41	0.4069	0
B	0.24-0.25	0.2438	0
C	0.33-0.34	0.3324	0
D	0.38-0.39	0.3857	0
E	0.38-0.39	0.3835	0
F	0.25-0.26	0.2501	0
G	0.26-0.27	0.2638	0
H	0.32-0.33	0.3297	0
I	0.32-0.33	0.3302	0.06%

Tabel 3. Hasil Perhitungan CCT saat $T_c=0.01s$ dengan Damping 0%

Fault	TDS	critical trajectory	error
A	0.36-0.37	0.3670	0
B	0.22-0.23	0.2289	0
C	0.25-0.26	0.2511	0
D	0.34-0.35	0.3471	0
E	0.34-0.35	0.3471	0
F	0.23-0.24	0.2345	0
G	0.24-0.25	0.2477	0
H	0.26-0.27	0.2625	0
I	0.25-0.26	0.2594	0

Tabel 4. Hasil Perhitungan CCT saat $T_c=0.01s$ dengan Damping 5%

Fault	TDS	critical trajectory	error
A	0.43-0.44	0.4382	0
B	0.26-0.27	0.2616	0
C	0.32-0.33	0.3279	0
D	0.41-0.42	0.4115	0
E	0.41-0.42	0.4100	0
F	0.27-0.28	0.2709	0
G	0.28-0.29	0.2811	0
H	0.33-0.34	0.3359	0
I	0.33-0.34	0.3334	0

Tabel 5. Hasil Perhitungan CCT saat $T_c=0.005s$ dengan Damping 0%

Fault	TDS	critical trajectory	error
A	0.39-0.40	0.3943	0
B	0.24-0.25	0.2460	0
C	0.25-0.26	0.2534	0
D	0.37-0.38	0.3702	0
E	0.37-0.38	0.3694	0
F	0.25-0.26	0.2516	0
G	0.26-0.27	0.2644	0
H	0.26-0.27	0.2721	0.70%
I	0.25-0.26	0.2556	0

Tabel 6. Hasil Perhitungan CCT saat $T_c=0.005s$ dengan Damping 5%

Fault	TDS	critical trajectory	error
A	0.47-0.48	0.4730	0
B	0.28-0.29	0.2807	0
C	0.32-0.33	0.3257	0
D	0.44-0.45	0.4422	0
E	0.44-0.45	0.4415	0
F	0.29-0.30	0.2918	0
G	0.30-0.31	0.2995	0.17%
H	0.33-0.34	0.3377	0
I	0.33-0.34	0.3224	2.30%

V. KESIMPULAN

Metode critical trajectory terbukti akurat dalam menghitung nilai *Critical Clearing Time* (CCT). Hal ini dibuktikan dengan menggunakan metode *Time Domain Simulation* (TDS). *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dapat digunakan untuk meningkatkan kestabilan sistem, melalui nilai CCT yang semakin meningkat. Semakin besar nilai SCES, maka semakin besar nilai CCT yang didapat. Selain itu, koefisien *damping* terbukti dapat meredam osilasi apabila terjadi gangguan pada sistem kelistrikan. Semakin besar nilai *damping* maka nilai CCT akan semakin besar. Sehingga sistem dengan *damping* dan SCES akan memiliki kestabilan lebih baik daripada sistem tanpa keduanya.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui and M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, August 2010.
- [2] S. Wang, T. Wei and Z. Qi, "Supercapacitor Energy Storage Technology and its Application in Renewable Energy Power Generation System," *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*, 2008.
- [3] A. Priyadi, T. P. Sari, I. Hafidz, M. Pujiantara, N. Yorino and M. H. Purnomo, "Losing Synchronism Technique based on Critical Trajectory Method for Obtaining the CCT with Installing SCES," *ISITIA Conference*, pp. 63-66, 2018.
- [4] T. P. Sari, A. Priyadi, dan M. Pujiantara, "Improving Transient Stability Assessment by Installing Supercapacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism", *ISITIA Conference*, pp. 2-3, 2018.
- [5] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1994.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, 1994.
- [7] S. Sharma, S. Pushpak and V. Chinde, "Sensitivity of Transient Stability Critical Clearing Time," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, 2018.
- [8] J. R. Miller, "Introduction to Electrochemical Capacitor Technology", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 2010.
- [9] M. Krpan and I. Kuzle, "Accurate Model of a Supercapacitor Bank for Power System Dynamics Studies," pp. 1–9, 2019.
- [10] A. Priyadi, A. A Nurhasyimi, T. P. Sari, and V. Lystianingrum, "Peletakan Supercapacitor Energy Storage (SCES) Berdasarkan Metode Critical Trajectory untuk Memperbaiki Nilai Critical Clearing Time (CCT)", *SinarFe7*, vol. 2, no. 1, pp. 44-47, Jul. 2019.