

Peletakan *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) Berdasarkan Metode *Critical Trajectory* untuk Memperbaiki Nilai *Critical Clearing Time* (CCT)

¹ Ardyono Priyadi, ² Almira Atha Nurhasyimi, ³ Talitha Puspita Sari, ⁴ Vita Lystianingrum

^{1,2,3,4} Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

¹ priyadi@ee.its.ac.id, ² almiratha@gmail.com, ³ talithapuspita@gmail.com, ⁴ vitagrums@gmail.com

Abstrak - Kestabilan sistem merupakan salah satu aspek penting yang harus diperhatikan guna menjaga kontinuitas dan reliabilitas sistem tenaga listrik. Ketika sistem mengalami gangguan besar, maka perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk memastikan bahwa sistem mampu mempertahankan sinkronisasinya pada kondisi transien. Agar sistem dapat stabil, gangguan harus segera dihilangkan dengan mempertimbangkan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT). Jika waktu pemutusan gangguan oleh sistem proteksi melebihi nilai CCT, maka sistem akan menjadi tidak stabil. Untuk meningkatkan jaminan kestabilan sistem, maka *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) dipasang pada salah satu bus generator dalam sistem. Pada penelitian ini akan dilakukan pencarian bus generator yang tepat sebagai lokasi peletakan SCES. Pemilihan lokasi peletakan SCES terbaik dilakukan berdasarkan nilai CCT sistem yang diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory*. Lintasan kritis (*critical trajectory*) merupakan lintasan yang dimulai dari suatu titik pada lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*) hingga mencapai suatu titik kritis di mana sistem kehilangan sinkronisasi. Hasil simulasi menunjukkan bus generator 3 (bus 3) sebagai lokasi peletakan SCES terbaik untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 5,50%.

Kata Kunci: Kestabilan Transien, *Critical Clearing Time* (CCT), *Critical Trajectory*, *Supercapacitor Energy Storage* (SCES)

Abstract - System stability is an important aspect that should be observed to maintain the continuity and reliability of the electrical power system. When a large disturbance occurs in a system, transient stability studies are needed to conduct to ensure that the system can withstand the transient condition. The system will remain stable if the fault in a system is immediately removed by considering the *Critical Clearing Time* (CCT). If the protection equipment operates after the value of CCT, the system becomes unstable. In order to improve system stability, a *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) installed on a generator bus. In this final project, a search for the right generator bus as the location for SCES placement will be carried out. The best location for SCES placement is selected based on the system CCT values obtained using the *Critical Trajectory* method. The *critical trajectory* is defined as the trajectory that starts from a point on a *fault-on trajectory* and reaches a critical point that satisfies a set of condition of losing synchronism. The simulation result shows generator bus number 3 as the best placement

location of SCES for Fouad and Anderson 3-machine 9-bus system with an increase of the system's CCT average values of 5,50%.

Keywords- *Transient Stability*, *Critical Clearing Time* (CCT), *Critical Trajectory*, *Supercapacitor Energy Storage* (SCES)

I. Pendahuluan

Sistem tenaga listrik beroperasi pada suatu kondisi yang tidak linear, dengan beban, daya generator maupun parameter-parameter lainnya selalu mengalami perubahan. Untuk menjaga kontinuitas dan reliabilitas sistem, maka kestabilan sistem perlu diperhatikan. Secara umum, kestabilan sistem merupakan kemampuan suatu sistem tenaga dalam mempertahankan dan mendapatkan kembali kondisi operasi setimbangnya setelah mengalami gangguan, baik gangguan kecil maupun gangguan besar.

Ketika sistem mengalami gangguan besar, maka perlu dilakukan studi kestabilan transien untuk memastikan bahwa sistem mampu mempertahankan sinkronisasinya pada kondisi transien [1]. Gangguan yang terjadi dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara daya input mekanik dari *prime mover* dan daya output elektrik pada sistem. Rotor mesin sinkron yang awalnya berputar pada kecepatan konstan, kemudian mengalami percepatan atau perlambatan putaran. Apabila kondisi ini terus terjadi, maka sistem terancam kehilangan sinkronisasi dan menjadi tidak stabil. Agar sistem dapat stabil, gangguan harus segera dihilangkan dengan mempertimbangkan waktu pemutusan kritis atau *Critical Clearing Time* (CCT). Sistem proteksi yang digunakan harus mampu memutus gangguan sebelum nilai CCT. Jika gangguan diputus melebihi waktu kritisnya, maka sistem menjadi tidak stabil.

Nilai CCT sistem diperoleh menggunakan metode *Critical Trajectory* [2]. *Critical Trajectory* (lintasan kritis) merupakan lintasan yang dimulai dari suatu titik pada lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*) hingga mencapai suatu titik kritis dimana sistem kehilangan sinkronisasi. Kelebihan dari metode ini adalah mampu mendapatkan nilai CCT yang tepat secara langsung.

Untuk meningkatkan jaminan kestabilan sistem, maka *Supercapacitor Energy Storage* (SCES) ditambahkan dalam sistem [3]. SCES merupakan perangkat penyimpanan daya yang mampu menyimpan dan melepaskan daya listrik ke sistem secara cepat dengan jumlah yang besar. Dalam sistem, SCES dipasang pada salah satu bus generator untuk membantu meredam osilasi yang terjadi saat sistem mengalami gangguan.

Pada penelitian ini akan mencari bus generator yang tepat untuk meletakkan SCES dalam sistem. Hal ini bertujuan untuk memperoleh nilai CCT sistem yang optimal. Pemilihan bus generator terbaik dilakukan berdasarkan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem terbesar setelah pemasangan SCES pada bus generator tertentu.

II. Kestabilan Sistem Tenaga

A. Kestabilan Transien

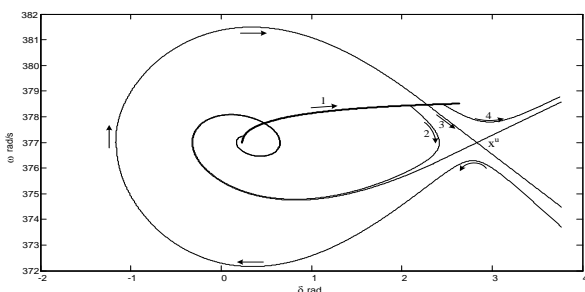
Kestabilan transien merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasinya ketika sistem mengalami gangguan besar, misalnya hubung singkat pada saluran transmisi atau lepasnya generator dari sistem. Respons sistem yang dihasilkan berupa penyimpanan sudut rotor generator dan dipengaruhi oleh hubungan *power-angle* yang tidak linear. Kestabilan transien bergantung pada kondisi operasi awal sistem dan tingkat keparahan gangguan yang terjadi. Umumnya, periode waktu dilakukannya studi kestabilan transien terbatas pada 3 hingga 5 detik setelah terjadinya gangguan. Namun periode tersebut dapat diperpanjang hingga 10 detik untuk sistem yang sangat besar.

B. Critical Clearing Time (CCT)

Untuk mempertahankan kestabilan suatu sistem tenaga, sistem proteksi harus dapat memutus gangguan dengan segera. *Critical Clearing Time (CCT)* atau waktu pemutusan kritis merupakan batas waktu maksimum yang diizinkan untuk memutus gangguan pada sistem. Sistem dapat kembali stabil jika gangguan diputus sebelum nilai CCT. Namun jika waktu pemutusan gangguan yang terjadi melebihi nilai CCT, maka generator akan kehilangan sinkronisasinya dan sistem menjadi tidak stabil.

C. Critical Trajectory

Lintasan kritis (*critical trajectory*) dapat didefinisikan sebagai lintasan yang dimulai dari suatu titik pada lintasan terjadinya gangguan hingga mencapai suatu titik kritis dimana sistem kehilangan sinkronisasinya [2]. Gambar 1 menunjukkan lintasan untuk sistem *single machine* yang terhubung dengan *infinite bus* tanpa *damping*.



Gambar 1. Lintasan untuk sistem *single machine* yang terhubung dengan *infinite bus* tanpa *damping* [2]

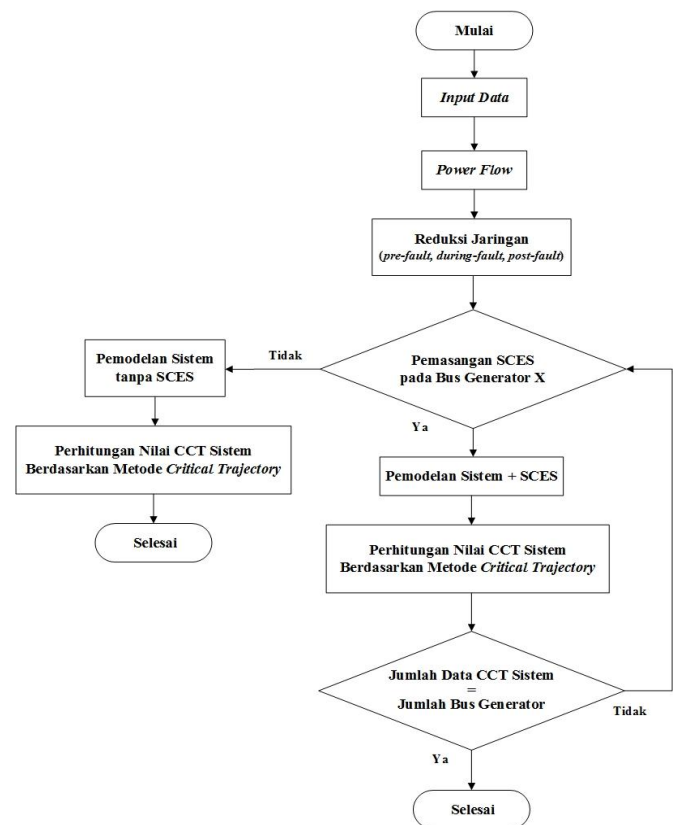
Terdapat empat jenis lintasan yang menggambarkan suatu kondisi tertentu. Lintasan 1 merupakan lintasan saat terjadinya gangguan (*fault-on trajectory*). Lintasan 2 merujuk pada kondisi stabil dari sistem, dimana gangguan dihilangkan cukup awal. Lintasan tersebut kemudian beresolusi di sekitar SEP (*Stable Equilibrium Point*). Lintasan 4 merujuk pada kondisi sistem yang tidak stabil akibat

gangguan yang terlambat dihilangkan. Sementara lintasan 3 adalah lintasan kritis (*critical trajectory*) yang menggambarkan kondisi kritis suatu sistem.

D. Supercapacitor Energy Storage (SCES)

Superkapasitor merupakan salah satu teknologi penyimpanan energi dengan kerapatan daya yang lebih tinggi dibanding kapasitor konvensional dan kerapatan energi yang lebih tinggi dibanding baterai [4]. Karena kemampuannya untuk menyimpan dan melepaskan daya dalam jumlah besar dengan cepat, *Supercapacitor Energy Storage (SCES)* dapat digunakan dalam membantu meningkatkan kestabilan sistem selama periode transien. Prinsip kerja superkapasitor pada dasarnya sama seperti kapasitor konvensional. Namun, superkapasitor memiliki elektroda dengan permukaan yang lebih luas dan dielektrik yang lebih tipis sehingga jarak antar elektroda berkurang.

III. Metodologi Pengerjaan



Gambar 2. Flow Chart

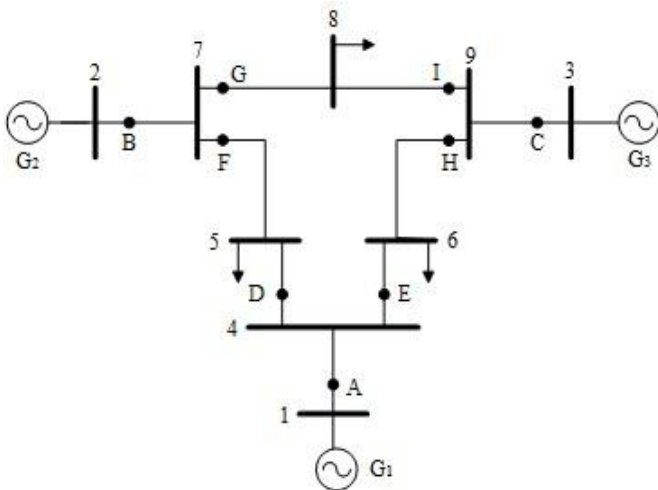
A. Persiapan Data Awal

Simulasi dilakukan pada sistem Fouad dan Anderson *3-machine 9-bus*. Diasumsikan bahwa setiap saluran transmisi terdiri atas saluran ganda dan terjadi gangguan tiga fasa di sebuah titik yang letaknya sangat dekat dengan bus pada saluran paralel. Gangguan tersebut kemudian ditangani dengan membuka saluran yang mengalami

gangguan.

Telah ditentukan 9 titik lokasi terjadinya gangguan pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus, yaitu:

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



Gambar 3. Single Line Diagram sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus beserta 9 titik lokasi gangguan.

B. Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem multi-machine didefinisikan menggunakan model generator X'_d , di mana setiap generator direpresentasikan oleh dua persamaan diferensial. Persamaan ayunan berdasarkan referensi Center of Inertia (COI) atau Center of Angle (COA) dapat dituliskan dengan [5]

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\theta) - \frac{M_i}{M_T} P_{COA} - D_i(\dot{\omega}_i) \quad (1)$$

$$\dot{\theta}_i = \omega_i \quad (2)$$

Pada penelitian ini, tidak dilakukan pemodelan Supercapacitor Energy Storage (SCES), baik controller maupun state of charging-discharging dari SCES. Diasumsikan bahwa SCES selalu berada dalam kondisi kosong, sehingga dapat langsung bekerja saat sistem mengalami gangguan. Selain itu, SCES hanya bekerja dengan cara menyerap (absorb) daya.

Perangkat SCES akan dipasang pada salah satu bus generator dalam sistem secara bergantian. Kapasitas SCES (P_{SCES}) telah ditentukan nilainya sebesar 0,1 p.u. atau setara dengan 10 MVA. Dalam sistem, P_{SCES} dimodelkan secara matematis dengan memodifikasi persamaan ayunan sistem menjadi [6]

$$M \dot{\omega} = P_m - P_e - P_{SCES} \quad (3)$$

Keterangan:

- M = momen inersia
- ω = kecepatan sinkron (rad-mekanik/detik)
- P_{SCES} = daya SCES (p.u.)

C. Perhitungan Nilai Critical Clearing Time Menggunakan Metode Critical Trajectory Berdasarkan Modified Losing Synchronism [2]

Lintasan kritis (critical trajectory) didefinisikan sebagai lintasan setelah terjadinya gangguan (post-fault trajectory) dengan kondisi batasan sebagai berikut

1. Kondisi titik awal

Titik awal lintasan kritis berada pada fault-on trajectory, yaitu ketika gangguan diputus saat waktu pemutusan kritis atau CCT.

$$x^0 = X_F(CCT, x_{pre}) \quad (4)$$

2. Kondisi titik akhir

Kondisi titik akhir dari metode yang digunakan berdasarkan pada kondisi hilangnya sinkronisasi pada sistem multi-machine.

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot v \text{ dengan } |v| \neq 0 \quad (5)$$

di mana $v \in R^{N_{Gen}}$ adalah eigenvector yang bersesuaian dengan zero eigenvalue dari matriks $[\partial P / \partial \theta] \in R^{N_{Gen} \times N_{Gen}}$ dan N_{Gen} adalah jumlah generator. Diasumsikan suatu kondisi dimana eigenvector harus sesuai dengan perubahan arah θ , sehingga berlaku skalar $k_s \in R$ untuk persamaan

$$v = k_s \cdot \dot{\theta} \quad (6)$$

Untuk metode modifikasi hilangnya sinkronisasi (Modified Losing Synchronism Method), diasumsikan bahwa eigenvector v selalu searah terhadap UEP (Unstable Equilibrium Point), yaitu titik hilangnya sinkronisasi sistem, sehingga scalar k_s dapat dianggap konstan. Hal ini bertujuan untuk mengurangi jumlah persamaan yang diperlukan agar proses perhitungan menjadi lebih cepat.

Jika nilai $k_s=1$, maka persamaan (6) dapat dituliskan menjadi

$$v = \dot{\theta} \quad (7)$$

dan diperoleh persamaan

$$0 = \left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot \dot{\theta} \quad (8)$$

IV. Simulasi Dan Analisis

Dalam memilih bus generator terbaik untuk meletakkan Supercapacitor Energy Storage (SCES), diperlukan data nilai Critical Clearing Time (CCT) sistem saat sebelum dan setelah pemasangan SCES. Pemasangan SCES dilakukan secara bergantian pada salah satu bus generator untuk memperoleh nilai CCT sistem dari setiap case peletakan SCES.

Karena simulasi dilakukan pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus, maka terdapat tiga pilihan lokasi peletakan SCES,

yaitu bus generator 1, bus generator 2, dan bus generator 3.

Tabel 1.

Nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus tanpa SCES dan dengan SCES

CCT Sistem dengan Metode <i>Critical Trajectory</i>					
Fault Point	Open Line	Tanpa SCES	Dengan SCES		
			Bus Gen 1	Bus Gen 2	Bus Gen 3
A	1-4	0,3420	0,3328	0,3667	0,3667
B	2-7	0,2128	0,2090	0,2289	0,2097
C	3-9	0,2595	0,2562	0,2578	0,2884
D	4-5	0,3260	0,3182	0,3471	0,3470
E	4-6	0,3254	0,3176	0,3464	0,3463
F	5-7	0,2246	0,2215	0,2424	0,2209
G	7-8	0,2324	0,2285	0,2474	0,2311
H	6-9	0,2574	0,2529	0,2622	0,2777
I	8-9	0,2609	0,2569	0,2635	0,2874
Rata-Rata		0,2712	0,2660	0,2847	0,2861

Nilai selisih pada tabel 2 merupakan selisih antara nilai rata-rata CCT sistem dengan SCES dan nilai rata-rata CCT sistem tanpa SCES untuk masing-masing *case* peletakan SCES pada bus generator sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus. Selanjutnya dilakukan pemeringkatan (*ranking*) pada data selisih nilai rata-rata CCT yang telah diperoleh untuk mengetahui lokasi peletakan SCES dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem terbesar yang sekaligus menjadi bus generator terbaik untuk meletakkan SCES.

Tabel 2

Rata-rata nilai CCT untuk sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus tanpa SCES dan dengan SCES

Bus Gen	Rata-Rata CCT Sistem		Selisih (%)
	Tanpa SCES	Dengan SCES	
1	0,2712	0,2660	-1,94
2	0,2712	0,2847	4,97
3	0,2712	0,2861	5,50

Berdasarkan tabel 2, pemasangan SCES pada bus generator 3 dapat memberikan peningkatan nilai CCT sistem terbesar dibanding pemasangan SCES di bus generator lain. Sehingga dapat disimpulkan bahwa pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus, bus generator 3 (bus 3) merupakan lokasi peletakan SCES terbaik dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 5,50% (0,0149 detik).

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis data yang telah dilakukan pada sistem Fouad dan Anderson 3-machine 9-bus,

bus generator 2 (bus 2) dipilih sebagai lokasi peletakan SCES terbaik dengan peningkatan nilai rata-rata CCT sistem sebesar 4,97% (0,0135 detik).

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Saadat, *Power System Analysis*, Subsequent. McGraw-Hill College, 1998.
- [2] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui, dan M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, hlm. 1620–1626, Agu 2010.
- [3] T. P. Sari, A. Priyadi, dan M. Pujiatara, "Improving Transient Stability Assessment by Installing Super Capacitor Energy Storage using Critical Trajectory Method based on Modified Losing Synchronism," hlm. 5.
- [4] S. Wang, T. Wei, dan Z. Qi, "Supercapacitor Energy Storage Technology and its Application in Renewable Energy Power Generation System," dalam *Proceedings of ISES World Congress 2007 (Vol. I – Vol. V)*, D. Y. Goswami dan Y. Zhao, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, hlm. 2805–2809.
- [5] A. Priyadi *dkk.*, "Comparison of Critical Trajectory Methods for Direct CCT Computation for Transient Stability," *IEEJ Transactions on Power and Energy*, vol. 130, no. 10, hlm. 870–876, 2010.
- [6] D. Z. Ariandana, A. Priyadi, dan D. A. Asfani, "Optimasi Capacitor Energy Storage (CES) Menggunakan Differential Evolution Algorithm (DEA) untuk Kestabilan Transien Multimesin Berdasarkan Fungsi Energy," 2014.