

Pengaruh Penambahan SCES terhadap Critical Clearing Time dengan Metode Critical Trajectory

¹Talitha Puspita Sari, ²Rakaditra Astungkara, ³Ardyono Priyadi, ⁴Vita Lystianingrum

Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

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

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. Pada penelitian ini dapat diketahui jika penambahan SCES yang dimodelkan secara matematis dapat memperbaiki nilai CCT dari sistem.

Kata Kunci: kestabilan transien, critical clearing time, super capacitor energy storage, critical trajectory

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. In this research, we will know that mathematically model of SCES can improve the value of CCT in system.

Keywords- transient stability, critical clearing time, critical trajectory, super capacitor energy storage

I. PENDAHULUAN

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 Capacitor 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. Dalam penelitian 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.

II. TEORI PENUNJANG

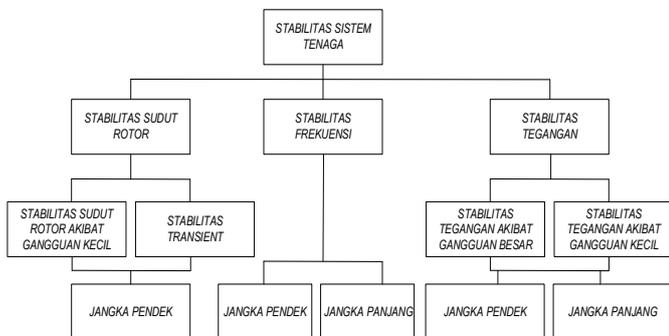
A. Stabilitas Sistem

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 [1]. Pembangkit yang sinkron bekerja paralel

bersama dengan pembangkit yang lain memiliki keluaran daya listrik yang seimbang dengan daya input mekanis dapat dikatakan sistem beroperasi dengan stabil. Adanya gangguan dapat mempengaruhi stabilitas sistem. Gangguan seperti perubahan beban, hubung singkat, generator lepas yang tidak terduga, menyebabkan sistem berusaha untuk mempertahankan kondisi pasokan listrik yang sesuai dengan permintaan. Hal tersebut bisa membebani pekerjaan dari pembangkit yang lain, yang bekerja paralel bersama, bahkan belum menjamin seluruh pembangkit sendiri bisa mempertahankan sinkronisasinya agar tidak lepas dari sistem, sehingga perlu ditentukannya waktu kritis pemutusan / *Critical Clearing Time* (CCT). CCT merupakan waktu kritis pemutusan yang diperbolehkan untuk menghilangkan gangguan.

Mengacu pada paper [2] Definition and Classification of Power System Stability, IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, stabilitas sistem dibagi menjadi tiga yaitu :

- Stabilitas sudut rotor
- Stabilitas frekuensi
- Stabilitas tegangan



Gambar 1. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

1) Stabilitas Sudut Rotor

Kestabilan sudut rotor adalah kemampuan mesin sinkron yang terinterkoneksi 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 listrik akan bernilai sama atau disebut dengan *equilibrium condition*, jika kesetimbangan terganggu maka akan menyebabkan percepatan atau perlambatan pada rotor mesin tersebut [3]. 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

B. Kestabilan Transien

Stabilitas *transient* merupakan kemampuan sistem untuk mempertahankan sinkronisasinya agar tidak lepas dengan sistem ketika terjadi gangguan - gangguan besar secara tiba-tiba selama sekitar satu ayunan pertama (*first swing*) ketika pengatur tegangan otomatis (AVR) dan *governor* belum bekerja.

Analisis kestabilan transien mengamati perilaku sistem saat terjadi gangguan berupa :

1. Perubahan beban secara tiba-tiba akibat terputusnya unit pembangkit
2. Hubung singkat atau pemutusan saklar pada saluran

C. Critical Clearing Time

Critical clearing time (CCT) merupakan batas waktu kritis pemutusan dan penghilangan gangguan maksimal yang dapat dilakukan oleh peralatan proteksi tanpa mengganggu operasi normal sistem. Dalam pengaturan koordinasi proteksi, kestabilan transien perlu dijadikan suatu pertimbangan. Kestabilan transien sendiri dinyatakan dalam bentuk nilai CCT. 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. Koordinasi proteksi dilakukan dengan cara mengatur kerja antar peralatan proteksi yaitu relay, yang nantinya akan memerintahkan *circuit breaker* untuk memutuskan gangguan [6]. Waktu operasi relay dan *circuit breaker* ditunjukkan oleh table berikut

Tabel I. Clearing Time Interval Relay

Operasi Relay	Tipe relay	
	Statis	Elektromekanis
Waktu membuka <i>circuit breaker</i>	0.08 s	0.08 s
Relay <i>overtravel</i>	0.00 s	0.10 s
Toleransi relay dan <i>error</i>	0.12 s	0.12 s
Total CTI	0.2 s	0.30 s

D. Critical Trajectory

Berdasarkan referensi [4]-[5], *critical trajectory* atau lintasan kritis merupakan lintasan yang dimulai dari titik terjadinya gangguan (*fault on*) hingga mencapai titik kritis dimana sistem akan kehilangan sinkronisasi seperti pada gambar 2, batas kestabilan dapat ditentukan dan digunakan untuk meminimalisasi masalah perhitungan nilai UEP sehingga diperoleh nilai CCT untuk mencapai kestabilan sistem.

E : Titik gangguan antara bus 5 dan bus 7

Single Line Diagram untuk sistem tersebut ditunjukkan oleh gambar 4. 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.

C. Metode Critical Trajectory

Terdapat tiga kondisi pada analisis kestabilan transien yaitu kondisi sebelum terjadi gangguan, selama gangguan dan setelah gangguan [4]. Kondisi awal yaitu sebelum gangguan (X_{pre}) adalah kondisi saat sistem beroperasi pada titik kestabilannya. Kemudian muncul gangguan pada saat $t=0$ hingga $t=\tau$ atau dapat dikatakan sistem mengalami gangguan selama $[0, \tau]$ ditunjukkan oleh persamaan

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

dimana

$$x \in R^N, t \in R, f_F: R^N \rightarrow R^N \quad (2)$$

Kurva solusi untuk persamaan tersebut disebut fault-on trajectory dan dirumuskan dengan

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3)$$

$$X_F(t; x_{pre}): R \rightarrow R^N \quad (4)$$

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

$$\dot{x} = f(x), \tau \leq t \leq \infty; f: R^N \rightarrow R^N \quad (5)$$

Kurva solusi untuk persamaan (5) disebut post-fault trajectory dan dirumuskan dengan

$$x(t) = X(t; x^0), \tau \leq t \leq \infty; X(t; x^0): R^N \rightarrow R^N \quad (6)$$

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

$$x^0 = X_f(\tau; x_{pre}) \quad (7)$$

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

$$x^0 = X_f(CCT; x_{pre}) \quad (8)$$

D. Modifikasi Metode Trapezoidal

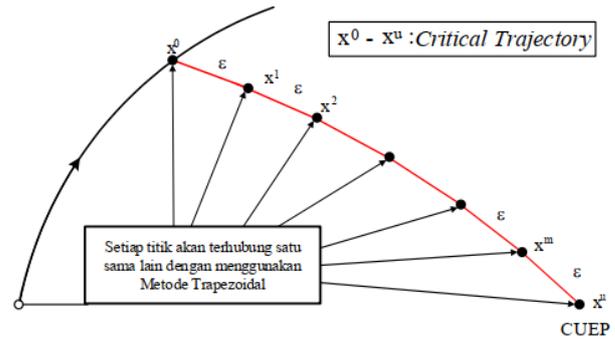
Metode trapezoidal merupakan langkah mula untuk menggambarkan critical trajectory. Berdasarkan persamaan dibawah pada saat t^k variabel t diubah menjadi x sehingga notasinya menjadi x^k . Maka persamaan trapezoidal konvensional yaitu

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2} (x^{k+1} + x^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (9)$$

dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k) \quad (10)$$

lambang k merupakan iterasi terhadap waktu.



Gambar 5. Modifikasi Trapezoidal

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 5 mengilustrasikan critical trajectory, dimana terdapat dua titik x^0 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

$$\epsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2} |x^{k+1} + x^k| (t^{k+1} - t^k) \quad (11)$$

Langkah kedua yaitu mengubah waktu t pada menjadi domain jarak

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|x^{k+1} + x^k|} \epsilon \quad (12)$$

Kemudian persamaan (12) disubstitusikan ke persamaan (9) menjadi

$$x^{k+1} - x^k - \frac{x^{k+1} + x^k}{|x^{k+1} + x^k|} \epsilon = 0 \quad (13)$$

Proses transformasi yang direpresentasikan dengan persamaan (13) lebih memungkinkan untuk menggambarkan critical trajectory dengan nilai batas waktu yang mempunyai jarak.

E. Modifikasi Losing Synchronism

Pada gambar 5 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 [8]. Pada sistem multi mesin, koefisien sinkronisasi ditunjukkan oleh persamaan 14

$$\left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] v = 0 \quad (14)$$

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

$$v = k_s \cdot \theta \quad (15)$$

Nilai dari k_s dianggap konstan untuk mereduksi jumlah dari persamaan sehingga

$$k_s = 1 \quad (16)$$

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

$$\left[\frac{\partial P}{\partial \theta} \right] \cdot \theta = 0 \quad (17)$$

F. Penambahan SCES

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

Saat terjadi gangguan, akan terjadi osilasi akibat nilai daya listrik mengalami penurunan sehingga dapat menyebabkan sistem kehilangan sinkron. Pemasangan SCES diharapkan mampu menyerap daya mekanis atau seolah-olah SCES bekerja sebagai beban. SCES diletakkan pada salah satu bus generator kemudian akan dilihat respon dari sistem. Pemodelan P_{scs} secara matematis [8] ditunjukkan oleh persamaan berikut

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - P_{ei}(\delta) \frac{M_i}{M_T} P_{coi} - P_{scs} \quad (18)$$

Keterangan

- M = Momen inersia
- $\dot{\omega}$ = Kecepatan sinkron (rad/s)
- P_m = Daya mekanis (pu)
- P_e = Daya listrik (pu)
- M_i = Momen inersia generator i
- M_T = Total momen inersia
- P_{coi} = Daya keseimbangan sebagai referensi sinkron
- P_{scs} = Daya SCES (pu)

Sedangkan nilai dari P_{scs} diperoleh dari persamaan

$$P_{scs} = \frac{MVA_{scs}}{MVA_{base}} \quad (19)$$

Nilai MVA_{scs} yang digunakan pada penelitian ini adalah 10 MVA hingga 100 MVA, sedangkan nilai MVA_{base} adalah 100 MVA_{base} . Peletakan dari SCES sendiri adalah di bus generator dan pada penelitian ini diasumsikan diletakkan pada bus generator 2.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

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, penambahan SCES dilakukan dari kapasitas 0,1 pu hingga 1 pu.

A. Analisis Nilai CCT 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).

Tabel II. Nilai CCT Pada Sistem tanpa SCES

Fault	Critical Trajectory		Time Domain Simulation		Error (s)
	CCT (s)	CPU (s)	CCT (s)	CPU (s)	
A	0,2890	2,1342	0,29-0,30	256,100	-0,001
B	0,2085	0,385	0,20-0,21	46,200	0
C	0,2860	0,4642	0,28-0,29	55,704	0
D	0,2839	0,4306	0,28-0,29	51,672	0
E	0,2034	0,4127	0,21-0,22	49,524	-0,0066

B. Analisis Nilai CCT dengan Penambahan SCES

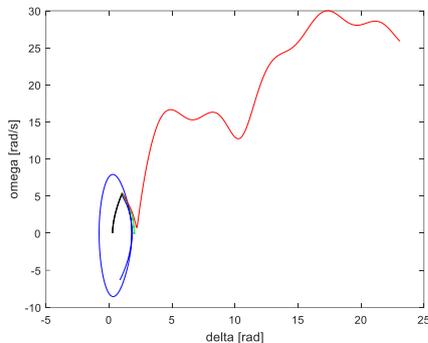
Pada saat gangguan tiga fasa pada titik gangguan, dilakukan simulasi pemasangan SCES dengan $\Delta SCES$ sebesar 0,1 pu hingga 1 pu.

Tabel III. Nilai CCT pada Sistem dengan SCES

Nilai SCES (pu)	CCT (s)				
	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 III, nilai CCT berbanding lurus dengan penambahan kapasitas SCES sehingga perlu ditambahkan suatu batasan terhadap kondisi ini untuk penelitian selanjutnya.

Gambar 6 menunjukkan perbandingan kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ) di titik gangguan ketika terjadi penambahan nilai SCES, *critical trajectory* berwarna hijau berada pada batas kondisi stabil dan tidak stabil, sedangkan lintasan berwarna biru beresilasi pada SEP, sehingga sistem dapat dikatakan stabil.



Gambar 6. Respon ω terhadap δ Critical Trajectory

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. L. Grigsby, *Power System Stability and Control, Third Edition*. 2016.
- [2] "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.
- [3] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power system analysis*. New York, NY: McGraw Hill, 1994.
- [4] N. Yorino, A. Priyadi, H. Kakui, and M. Takeshita, "A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1620–1626, Aug. 2010.
- [5] A. Priyadi *et al.*, "Critical Trajectory Method for Transient Stability Analysis," in *2008 International Conference on Computer and Electrical Engineering*, Phuket, Thailand, 2008, pp. 291–295.
- [6] "IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems," p. 751.
- [7] J. Miller, "Introduction to electrochemical capacitor technology," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 26, no. 4, pp. 40–47, Jul. 2010.
- [8] 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.