

ANALISA *CRITICAL CLEARING TIME* PADA KESTABILAN *TRANSIENT* SISTEM TENAGA LISTRIK AKIBAT KONDISI GANGGUAN TIDAK SEIMBANG

¹⁾Irrine Budi Sulistiawati ²⁾ Ardyono Priyadi ³⁾ Isa Hafidz ⁴⁾ M Ibrahim Ashari

^{1,4)} Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Malang
Raya Karanglo Km 2 Malang

^{2,3)} Laboratorium Instrumentasi Pengukuran dan Identifikasi Sistem Tenaga
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya
Keputih Sukolilo Surabaya
Email : irrine_elektro@lecturer.itn.ac.id

Abstrak . Analisa kestabilan transien berperan penting untuk keamanan dan keandalan operasi sistem tenaga listrik. Pada dasarnya analisa dilakukan melalui simulasi numerik yang mana integrasi numerik menyelesaikan integrasi langkah demi langkah dari nilai awal untuk mendapatkan dinamika respon gangguan. metoda trajektori kritis (*critical trajectory*) berbasis pada perhitungan trajektori kritis yang didefinisikan sebagai trajektori yang bermula dari titik pada trajektori saat gangguan di CCT dan mencapai titik akhir yaitu sebuah kondisi hilangnya sinkronisasi atau *losing synchronism*. Untuk menguji keefektifan metode yang digunakan, dilakukan simulasi pada sistem 3 generator dan 9 bus. Dari hasil simulasi menunjukkan metode ini mampu memberikan hasil akurat dengan ditunjukkan pada hasil cct sama dengan metode yang sudah diakui keakuratannya yaitu Time Domain Simulation

Kata kunci: *critical clearing time, critical trajectory, waktu pemutusan kritis, kestabilan transien .*

1. Pendahuluan

Analisa kestabilan transient pada sistem tenaga listrik erat kaitannya dengan waktu pemutusan kritis atau yang dikenal dengan critical clearing time (cct). Nilai critical clearing time digunakan untuk acuan di dalam menentukan setting rele pengaman pada sebuah sistem. Ketika gangguan terjadi, apabila circuit breaker berhasil memutus gangguan sebelum cct bekerja, maka sistem akan kembali stabil. Sebaliknya, ketika circuit breaker tidak berhasil melepas gangguan sehingga cct bekerja, maka sistem akan berada pada kondisi tidak stabil.

Sistem tenaga listrik pada umumnya terhubung interkoneksi satu dengan yang lainnya. Hal ini mengakibatkan sistem tidak bisa bebas dari gangguan. Salah satu usaha untuk mengamankan sistem dari gangguan adalah dengan pemasangan rele pengaman pada sistem. Ketika timbul gangguan, rele akan mendeteksi gangguan dan mentrigger circuit breaker untuk terbuka. Akan tetapi rele pengaman ini tidak menjamin sistem aman dari gangguan yang sudah terjadi dan sistem dapat kembali ke kondisi stabilnya.

Metode critical trajectory merupakan sebuah metode baru yang terbukti mampu menghitung nilai cct dengan akurat dan cepat apabila dibandingkan dengan menggunakan metode yang berbasis integrasi numerik [1-5]. Pemodelan sistem dengan mengadopsi kondisi sistem real dilakukan untuk melakukan analisa kestabilan transient sistem. Tujuan dari analisa ini adalah untuk mengetahui apakah sistem dapat bertahan dan tetap stabil seperti sebelum terjadi gangguan.

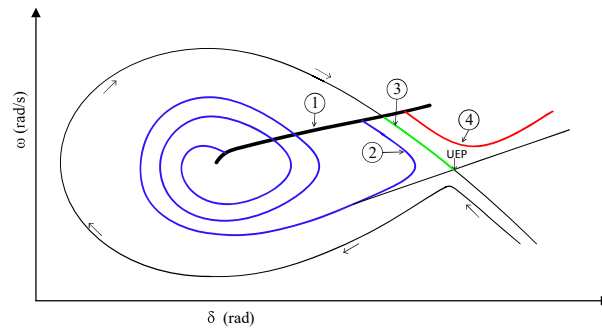
2. Metodologi

1. Kestabilan Transien

Kestabilan transien didefinisikan sebagai kemampuan sistem untuk mencapai titik kesetimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan[6] . Pada analisa kestabilan transient dilakukan untuk melihat perilaku sistem akibat adanya gangguan antara lain karena perubahan beban yang mendadak, atau pun karena adanya gangguan hubung singkat pada saluran.

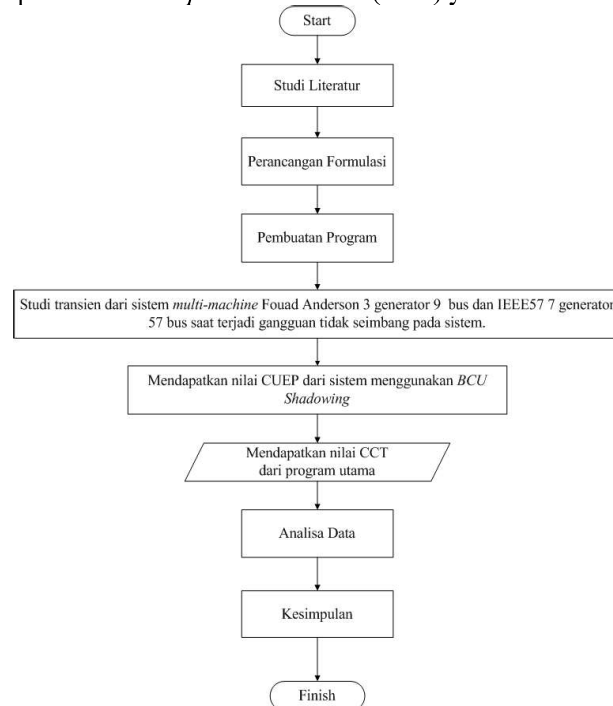
2. Critical Trajectory

Metode critical trajectory adalah sebuah metode baru yang merupakan sebuah lintasan kritis diawali dari titik terjadinya gangguan hingga ke titik sistem tepat akan kehilangan sinkronisasinya.



Gambar 1. Lintasan kritis satu generator terhubung pada *infinite bus* dengan *damping*.

Pada gambar 1. menunjukkan beberapa lintasan (*trajectory*) dari sebuah generator yang terhubung dengan *infinite bus* dengan *damping*. Lintasan “1” menunjukkan *fault on trajectory* yaitu lintasan saat terjadi gangguan yang dimulai dari *Stable Equilibrium Point* (SEP). Lintasan “2” menunjukkan kondisi sistem stabil setelah terjadinya gangguan. Lintasan “4” menunjukkan kondisi sistem tidak dapat kembali ke kondisi stabil setelah terjadinya gangguan dikarenakan gangguan terlambat diputus. Sedangkan lintasan “3” merupakan lintasan kritis (*critical trajectory*) suatu sistem tenaga listrik. Lintasan ini akan mencapai *Unstable Equilibrium Point* (UEP) yakni titik kritis dari sistem



Gambar 2. Diagram Alir Perhitungan Critical Clearing Time

3. Critical clearing time

Critical clearing time atau waktu pemutusan kritis merupakan waktu penentu sistem kembali ke keadaan stabilnya atau tidak. Terjadinya gangguan pada sistem harus ditindaklanjuti dengan pengisoliran gangguan sehingga tidak mempengaruhi sistem yang ada. Pengisolasian gangguan dilakukan dengan cara memutuskan gangguan melalui circuit breaker (cb) pada saluran maupun circuit breaker pada generator. Langkah langkah yang dilakukan dalam melakukan penelitian disini dapat ditunjukkan pada flowchart gambar 2.

Studi transien pada sistem *multi-machine* Fouad Anderson 3 generator 9 bus dilakukan dengan memberi gangguan pada sistem, kemudian dilakukan pemodelan simulasi. Dengan menggunakan hasil CUEP dari sistem *multi-machine* yang didapatkan dari *BCU Shadowing (metode B)* [6], kemudian dihitunglah nilai CCT.

4. Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik

Pada sistem tenaga listrik terdapat 2 jenis gangguan hubung singkat (short circuit), yaitu gangguan simetris (tiga fasa ke tanah) dan gangguan tidak simetris. Sebagian besar gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetri. Gangguan tidak simetri ini terjadi sebagai akibat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa, atau gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

Penguraian komponen tiga fasor tidak simetris dari tiga himpunan fasor simetris dilakukan dengan mengurangi banyaknya kuantitas yang diketahui yaitu dengan menyatakan masing-masing komponen V_b dan V_c sebagai hasil kali fungsi operator a dari komponen V_a .

Persamaan tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (1)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (2)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (3)$$

dari persamaan (1), (2), dan (3) dapat dikombinasikan menjadi bentuk matrik sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

apabila matrik (4) diinvers maka akan menjadi

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ di invers menjadi } A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

apabila dikembalikan ke dalam bentuk (2) akan menjadi,

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

dari matrik diuraikan kembali seperti pada bentuk persamaan akan menjadi

$$V_{a0} = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \quad (12)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3} (V_a + a V_b + a^2 V_c) \quad (13)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3} (V_a + a^2 V_b + a V_c) \quad (14)$$

Karena setiap gangguan tak simetri menyebabkan terjadinya aliran arus yang tidak seimbang ke dalam sistem, maka dibutuhkan metode komponen simetris dalam analisis untuk menentukan arus dan tegangan disemua titik yang terjadi gangguan. Tanpa memperhatikan jenis gangguan yang terjadi pada terminal generator, maka digunakan persamaan dalam bentuk matriks sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Untuk setiap jenis gangguan yang terjadi dapat diselesaikan dengan menurunkan I_{a1} dengan E_a , Z_0 , Z_1 , dan Z_2 sebagai suku-sukunya.

Gangguan 3 Fasa

Besarnya arus hubung singkat tiga fasa $I_{sc\ 3\phi}$ dapat dihitung dengan persamaan berikut

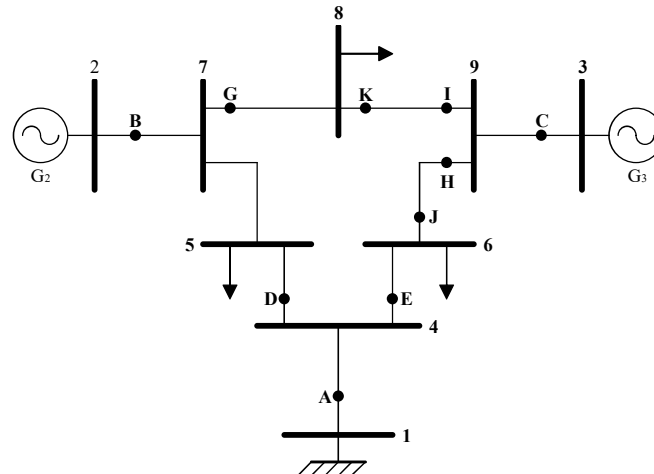
$$I_{sc\ 3\phi} = \frac{V_{LN}}{X_1} \quad (16)$$

3. Simulasi Dan Analisa

Simulasi yang dilakukan menggunakan sistem Fouad dan Anderson 3 generator yang ditunjukkan pada gambar 3.

Sedangkan gangguan diberikan pada titik titik dibawah ini

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



Gambar 3 Sistem 3generator 9-bus Fouad dan Anderson terhubung *infinite bus*
Dari simulasi yang dilakukan, diperoleh hasil sebagai berikut :

1. Simulasi perhitungan CCT pada Sistem 2-generator 9-Bus Fouad dan Anderson tanpa dan dengan Damping terhubung dengan Infinite Bus

Simulasi pertama yaitu melakukan simulasi untuk memperoleh cct dengan sistem terdiri dari 2 generator. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan metode yang sudah diakui keakuratannya yaitu Time Domain Simulation (TDS). Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Perbandingan nilai CCT critical trajectory dan TDS 2 generator 9 bus terhubung infinite bus

Fault Point	Open Line	Critical Trajectory		Time Domain Simulation (TDS)		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	-	-	-	-	
B	2-7	0,2056	0,3826	0,20-	111,33	
C	3-9	-	-	-	-	

D	4-5	-	-	-	-	
E	4-6	-	-	-	-	
G	7-8	0,2216	0,3760	0,22-	111,09	
H	6-9	0,2587	0,4913	0,25-	111,02	
I	8-9	0,2631	1,1213	0,26-	111,15	
J	6-9	0,5250	0,3842	0,52-	110,77	
K	8-9	0,3205	0,5677	0,32-	111,03	

Simulasi kedua yaitu melakukan simulasi untuk memperoleh cct dengan menggunakan sistem dengan damping. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan metode yang sudah diakui keakuratannya yaitu Time Domain Simulation (TDS). Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada tabel 2.

2. CCT pada Sistem 3-generator 9-Bus Fouad dan Anderson tanpa dan dengan Damping terhubung dengan Infinite Bus

Simulasi kedua yaitu melakukan simulasi untuk memperoleh cct dengan menggunakan sistem 3 generator tanpa dan menggunakan damping. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan metode yang sudah diakui keakuratannya yaitu Time Domain Simulation (TDS). Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perbandingan nilai CCT critical trajectory dan TDS 3 generator bus terhubung infinite bus

Fault Point	Open Line	3 Generator 9 Bus tanpa Damping		3 Generator 9 Bus dengan Damping	
		CCT(s)	CPU(s)	CCT (s)	CPU(s)
A	1-4	0,3744	0,3757	0,39	0,4963
B	2-7	0,2306	0,3816	0,23	0,4054
C	3-9	0,2833	0,3941	0,29	0,4223
D	4-5	0,3530	0,4674	0,36	0,4000
E	4-6	0,3530	0,4629	0,36	0,4891
F	5-7	0,2392	0,3598	0,24	0,4196
G	7-8	0,2457	0,3751	0,25	0,3922
H	6-9	0,2748	0,4308	0,29	0,4437
I	8-9	0,2842	0,6450	0,29	0,7119

4. Simpulan

Perhitungan CCT dengan menggunakan metode *critical trajectory* dengan adanya gangguan tiga fasa ke tanah menunjukkan bahwa metode ini mampu memberikan hasil sesuai dengan metode yang sudah establish yaitu Time Domain Simulation. Untuk melihat keefektifan metode yang digunakan dapat dilanjutkan dengan melakukan simulasi untuk beberapa gangguan yang terjadi bersama di beberapa titik. Kedepannya, dengan menggunakan sistem yang lebih besar diharapkan metode ini terbukti memberikan hasil yang diinginkan.

5. Daftar Pustaka

- [1]. Athey, T., Podmore, R., and Virmani, S.: "A Practical Method for Direct Analysis of Transient Stability", IEEE Trans. Power Apparatus and Sys-tems, 1979, vol. PAS-98, pp. 573-584.
- [2]. Anderson, P. M., and Fouad, A. A.: "Power System Control and Stability", vol. 1, Ames, IA: The Iowa State University Press, 1977.
- [3]. IEEE Power Engineering Society: "Inter-Area Oscillations in Power Systems", System Dynamic Performance Subcommittee Special Publication, 1995, 95TP101.
- [4]. IEEE Power Engineering Society: "Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools", Power System Stability Subcommittee Special Publication, 2003, SP101PSS.

- [5]. Yorino, N., Sasaki, H., Tamura, Y., and Yokoyama, R.: "A Generalized Analysis Method of Auto-Parametric Resonances in Power Systems", IEEE Trans. Power Systems, 1989, vol. 4, no. 3, pp. 1057-1064.
- [6]. Sulistiawati, IB., Priyadi, A., Qudsi, OA., et all. : "Critical Clearing Time Prediction Within Various Loads for Transient Stability Assessment by Means of the Extreme Learning Machine Method", International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 77, May 2016 Pages 345-352
- [7]. Yorino N, Priyadi A, Kakui H, Takeshita M. A new method for obtaining critical clearing time for transient stability. IEEE Transactions on Power Systems 2010; **25**(3): 1620-1626
- [8]. Yorino, N., Priyadi, A., Ridzuan, B.A.M., Sasaki, Y., Zoka, Y., Sugihara, H., "A Novel Method for Direct Computation CCT for TSA Using Critical Generator Conditions", TENCON, Fukuoka, Japan, 23 November 2010, pp 1-6.
- [9]. Priyadi, A., Yorino, N., Sasaki, Y., Tanaka, M., Fujiwara, T., Zoka, Y., Kakui, H., and Takeshita, M., "Comparison of Critical Trajectory Methods for Direct CCT Computation for Transient Stability," IEEJ Transactions on Power and Energy, pp. 870-876, October 2010, vol. 130, no. 10.
- [10]. *Priyadi, A.*, Yorino, N., Tanaka, M., Fujiwara, T., Zoka, Y., Kakui, H., and Takeshita, M., "A Direct Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability Using Critical Generator Conditions," European Transactions on Electrical Power, Vol. 22, no. 5, pp. 674-687, Juli 2012.
- [11]. Yorino, N., Priyadi, A., Zoka, Y., Sasaki, Y., Sugihara, H., "A New Method for Direct Computation of Critical Clearing Time for Transient Stability Analysis," Proc. on IREP, Rio De Janeiro, Brazil, August 2010, pp 1-9.
- [12]. Yorino, N., Priyadi, A., Ridzuan, B.A.M., Sasaki, Y., Zoka, Y., Sugihara, H., "Direct Computation of Critical Clearing Time for Transient Stability Analysis", Proceeding on 17th PSCC, Stockholm, Sweden, August 22-26, 2011.