

PERHITUNGAN *CRITICAL CLEARING TIME* UNTUK KESTABILAN TRANSIEN MENGUNAKAN METODE REDUKSI KRON

¹Sunnu Wahyu Setiawan, ²Irrine Budi Sulistiawati

Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Malang

Raya Karanglo Km 2 Malang

Sunnuwahyusetiawan@gmail.com Irrine@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Analisis kestabilan transien berperan penting untuk keamanan dan keandalan pada operasi sistem tenaga listrik. Kestabilan transien erat kaitannya dengan *critical clearing time* karena pada waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) dapat dilihat bagaimana sistem kembali pada keadaan stabil atau tidak stabil setelah mengalami gangguan. Tahapan dalam melakukan analisis kestabilan transien dibutuhkan proses reduksi matrik. Untuk tahapan tersebut agar memudahkan analisis kestabilan transien digunakan metode reduksi kron dalam mereduksi matrik pada sistem yang akan dianalisis. Simulasi dilakukan pada sistem multi-machine Fouad Anderson 3 generator 9 bus dengan gangguan yang terjadi pada bus 5 dan yang memutuskan gangguan yaitu pada saluran 5-7. Dari hasil simulasi menunjukkan metode reduksi kron dapat mereduksi matrik admitansi pada sistem dan menunjukkan nilai susceptansi agar memudahkan dalam melakukan perhitungan *critical clearing time*. Didapatkan nilai *critical clearing time* pada bus 5 adalah 0.569 sec.

Kata Kunci—Kestabilan transien, *Critical Clearing Time*, Reduksi Kron

Abstrac— The analysis of transient stability plays an important role for the safety and reliability of electric power system operation. The transient stability is closely related to critical clearing time because at the time of critical clearing time it can be seen how the system returns to a stable or unstable state after an interruption. Stages in performing transient stability analysis requires matrix reduction process. For these stages to facilitate the analysis of transient stability then used kron reduction method in reducing the matrix on the system to be analyzed. The simulation was carried out on a multi-machine Fouad Anderson 3 generator 9 bus system with interference that occurs in bus 5 and the one that clears the interruption was on bus 5-7. From the simulation results showed that the kron reduction method can reduce the admittance matrix in the system and showed the susceptance value to make it easier to perform critical clearing time calculation. The critical clearing time of bus 5 is 0.569 sec.

Keywords- Transien Stability, *Critical Clearing Time*, Kron Reduction

I. Pendahuluan

Analisa stabilitas sistem tenaga listrik telah diakui sebagai hal yang penting dalam mengatasi masalah pengoperasian system yang aman [1]. Banyak pemadaman listrik yang disebabkan oleh ketidak stabilan sistem tenaga mengilustrasikan pentingnya kestabilan sistem. Secara historis, ketidakstabilan transien telah menjadi masalah stabilitas yang dominan pada kebanyakan sistem, dan telah menjadi perhatian sebagian besar industry tentang stabilitas sistem [2].

Sistem tenaga listrik pada umumnya terhubung interkoneksi satu dengan yang lainnya. Hal ini mengakibatkan sistem tidak bisa bebas dari gangguan. Usaha untuk mengamankan sistem dari gangguan adalah dengan pemasangan rele pengaman pada sistem. Ketika timbul gangguan, rele akan mendeteksi gangguan dan mentrigger *circuit breaker* (*cb*) untuk terbuka. Akan tetapi rele pengaman ini tidak menjamin sistem aman dari gangguan yang sudah terjadi dan sistem dapat kembali ke kondisi stabilnya [3]. Tahapan dalam melakukan analisis kestabilan transien dibutuhkan reduksi matrik jaringan untuk mempermudah perhitungan dalam menentukan parameter parameter yang dapat digunakan dalam perhitungan *critical clearing time*.

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

gangguan sehingga critical clearing time bekerja, maka sistem akan berada pada kondisi tidak stabil.

Reduksi kron banyak digunakan sebagai metode penyederhanaan untuk sistem tenaga linear dan non linear[4][5]. Metode ini berfokus pada beberapa bus yang dipilih, sehingga perlu dilakukan untuk melakukan penomoran bus sistem dengan selektif agar dapat diketahui bus yang ingin dipertahankan dan bus yang ingin dieliminasi [6].

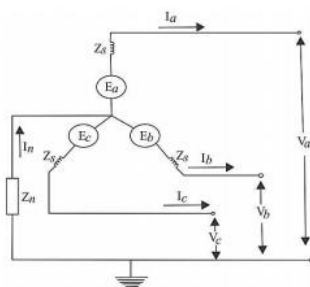
II. Metode Penelitian

1. Kestabilan Transien

kestabilan transien adalah suatu kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan kondisi sinkron ketika sistem mengalami gangguan transien. Gangguan transien merupakan gangguan besar yang bersifat tiba-tiba selama periode satu ayunan pertama. Ketabilan transien terjadi saat pegatur tegangan otomatis (AVR) dan pengatur frekuensi (governor) belum bekerja. Sistem dikatakan stabil ketika adanya keseimbangan antara daya mekanik pada *prime mover* dengan daya elektrik yang disalurkan ke beban. Apabila kondisi sistem yang tidak stabil tidak dipulihkan dengan segera, maka percepatan dan perlambatan putaran motor akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem. Apabila sistem mengalami kelebihan daya elektrik maka akan terjadi perlambatan pada rotor generator, hal ini disebabkan semakin terbebani generator. [7]

2. Gangguan 3 Fasa Simetris

Tipe gangguan ini didefinisikan sebagai gangguan hubung singkat tiga fasa, dimana gangguan itu jarang terjadi, tetapi merupakan tipe gangguan yang paling parah karena pada setaip saluran arus gangguan sama besarnya. [8]



Gambar 1. Sumber dan impedansi 3 fasa seimbang

Mesin sinkron membangkitkan tegangan internal tiga fasa dan direpresentasikan sebagai kelompok fasor urutan positif berikut :

$$E_{abc} = \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$a = 1 \angle 120^\circ = e^{j 120^\circ} \quad a^2 = 1 \angle 240^\circ = e^{j 240^\circ}$$

Mesin menyuplai beban seimbang tiga fasa. Penerapan hukum *kirchoff* untuk tegangan pada setiap fasa menghasilkan :

$$\begin{aligned} V_a &= E_a - Z_s I_a - Z_n I_n \\ V_b &= E_b - Z_s I_b - Z_n I_n \\ V_c &= E_c - Z_s I_c - Z_n I_n \end{aligned} \quad (2)$$

Substitusi untuk $I_n = I_a + I_b + I_c$ dan penulisan persamaan (2) dalam bentuk matriks adalah :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_s + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_s + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_s + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_{a0} &= 0 - Z_0 I_{a0} \\ V_{a1} &= E_a - Z_1 I_{a1} \\ V_{a2} &= 0 - Z_2 I_{a2} \end{aligned} \quad (4)$$

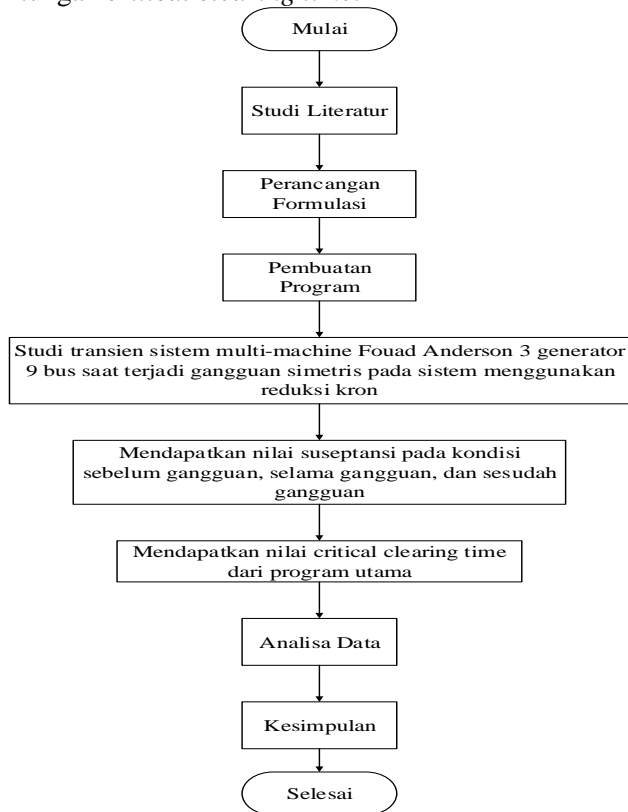
Maka arus saluran :

$$I_a = \frac{E_a}{Z_n} \quad (5)$$

3. Critical Clearing Time

Critical clearing time atau waktu pemutusan kritis merupakan waktu yang menentukan apakah sistem dapat kembali stabil atau tidak setelah mengalami gangguan. Jika suatu sistem tenaga listrik mengalami gangguan besar maupun gangguan kecil maka area yang terjadi gangguan harus dilakukan pengisolasian dengan cara pemutusan gangguan melalui *circuit breaker* (cb) saluran maupun pelepasan generator dari *circuit breaker* generator. Pemutusan yang dilakukan harus kurang dari waktu pemutusan kritis untuk memastikan sistem berada pada kondisi stabil setelah mengalami gangguan. [9] Studi transien yang dilakukan pada *multi-machine* Fouad Anderson 3 generator 9 bus dilakukan dengan memberi gangguan pada sistem, simulasi gangguan 3 fasa menggunakan metode reduksi kron untuk menampilkan nilai suseptansi pada kondisi sebelum, selama, dan setelah

gangguan untuk memudahkan dalam melakukan perhitungan *critical clearing time*.



Gambar 2. Diagram alir perhitungan *critical clearing time*

4. Reduksi Kron [6]

Eliminasi variabel identik dengan reduksi jaringan karena mengarah pada urutan rangkaian orde pengurangan yang setara dengan eliminasi node pada setiap langkah. Dengan penomoran selektif pada bus sistem, kita dapat menerapkan eliminasi gaussian sehingga dapat mengurangi Y_{bus} (bus admittance). Matriks koefisien dalam rangkaian persamaan *reduced-order* kemudian mewakili Y_{bus} untuk jaringan ekuivalen yang hanya berisi bus yang harus dipertahankan. Semua bus lainnya dihilangkan dalam pengertian matematis bahwa tegangan pada bus dan suntikan arusnya tidak tampak secara eksplisit. Pengurangan ukuran seperangkat persamaan tersebut menyebabkan efisiensi perhitungan dan membantu untuk lebih fokus secara langsung pada porsi keseluruhan jaringan yang menjadi kepentingan utama[4]. Berikut adalah contoh dari eliminasi Y_{bus} (matrik admittance) :

$$\begin{matrix} \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\ \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \end{matrix} \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

Gambar 3. matriks admittance sistem[4]

Dari matriks diatas akan mengeliminasi node 1, sehingga matriks admittance menjadi 3×3 .

$$\begin{matrix} \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \\ \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} \end{matrix} \begin{bmatrix} Y_{22}^{(1)} & Y_{23}^{(1)} & Y_{24}^{(1)} \\ Y_{32}^{(1)} & Y_{33}^{(1)} & Y_{34}^{(1)} \\ Y_{42}^{(1)} & Y_{43}^{(1)} & Y_{44}^{(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

Gambar 4. matriks admittance setelah direduksi[4]

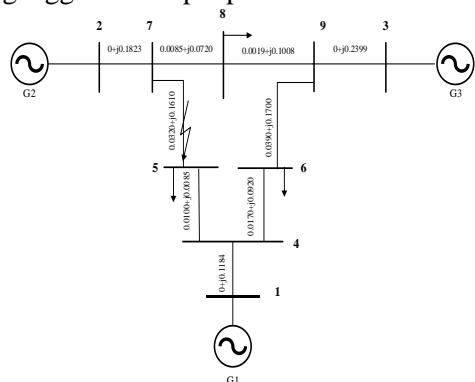
Untuk menghitung elemen elemen bus yang baru di reduksi dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Y_{jk(new)} = Y_{jk} - \frac{Y_{jp}Y_{pk}}{Y_{pp}} \quad (6)$$

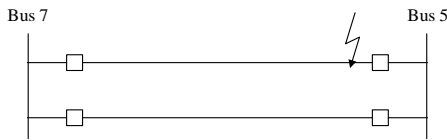
j merupakan kolom, p merupakan jumlah bus, sedangkan pada k merupakan jumlah baris. Dalam menentukan reduksi matriks menggunakan kron reduksi tentu saja harus menentukan bus admittansis sistem awal terlebih dahulu.

III. Hasil dan Pembahasan

Data yang digunakan pada penelitian yang dilakukan adalah sistem *multi-machine* Fouad Anderson 3 generator 9 bus yang ditunjukkan pada gambar 5. Dengan gangguan terjadi pada bus 5 dan saluran yang terbuka untuk memutus gangguan terdapat pada bus 5 dan bus 7.



Gambar 5. Single Line diagram IEEE 3 generator 9 bus dan gangguan berada pada bus 5



Gambar 6. Saluran pada bus 5 dan 7

Dari Simulasi yang dilakukan didapatkan hasil berikut

1. Hasil perhitungan nilai suseptansi berdasarkan matrik admitansi pada sistem pada kondisi

$X_1 =$

17.3611	0	0	17.3611	0	0	0	0	0	0
0	16.0000	0	0	0	0	0	16.0000	0	0
0	0	17.0648	0	0	0	0	0	0	17.0648
17.3611	0	0	39.4478	11.6841	10.6886	0	0	0	0
0	0	0	11.6841	17.5252	0	6.0920	0	0	0
0	0	0	10.6886	0	16.1657	0	0	0	5.7334
0	16.0000	0	0	6.0920	0	35.5564	13.7931	0	0
0	0	0	0	0	0	13.7931	23.4676	9.8522	0
0	0	17.0648	0	0	5.7334	0	9.8522	32.2461	0

Gambar 7. Nilai Suseptansi jaringan pada kondisi sebelum gangguan

$X_2 =$

17.3611	0	0	17.3611	0	0	0	0	0	0
0	16.0000	0	0	0	16.0000	0	0	0	0
0	0	17.0648	0	0	0	0	0	0	17.0648
17.3611	0	0	31.6580	10.6886	4.0616	0	0	0	0
0	0	0	10.6886	16.1657	0	0	0	0	5.7334
0	16.0000	0	4.0616	0	33.4701	13.7931	0	0	0
0	0	0	0	0	13.7931	23.4676	9.8522	0	0
0	0	17.0648	0	5.7334	0	9.8522	32.2461	0	0

Gambar 8. Nilai Suseptansi jaringan pada kondisi selama gangguan

$X_3 =$

17.3611	0	0	17.3611	0	0	0	0	0	0
0	16.0000	0	0	0	16.0000	0	0	0	0
0	0	17.0648	0	0	0	0	0	0	17.0648
17.3611	0	0	32.2380	10.6886	0	0	0	0	0
0	0	0	10.6886	16.1657	0	0	0	0	5.7334
0	16.0000	0	0	0	36.9733	13.7931	0	0	0
0	0	0	0	0	13.7931	23.4676	9.8522	0	0
0	0	17.0648	0	5.7334	0	9.8522	32.2461	0	0

Gambar 9. Nilai Suseptansi jaringan pada kondisi setelah gangguan

Pada kondisi awal sistem sebelum gangguan terdiri dari 9 bus sistem. Untuk melakukan simulasi gangguan 3 fasa menggunakan reduksi kron dengan menghapus salah satu bus beban dengan menggunakan persamaan (6)

sebelum gangguan, selama gangguan, dan sesudah gangguan

Simulasi yang dilakukan adalah menentukan nilai suseptansi berdasarkan matrik admitansi pada sistem saat kondisi sebelum gangguan, selama gangguan, dan sesudah gangguan. Berikut pada gambar 7, gambar 8, dan gambar 9 menunjukkan nilai suseptansi pada masing-masing kondisi.

sehingga bus yang terganggu dieliminasi yang tadinya bus sistem ada 9 karena dieliminasi menjadi 8 bus dan membentuk matrik admitansi baru.

2. Nilai *critical clearing time* pada bus 5 (mengalami gangguan).

Untuk menentukan nilai *critical clearing time* tentu tidak hanya membutuhkan nilai suseptansi pada berbagai macam kondisi, namun membutuhkan nilai pada tegangan pada bus sistem, generator output, momen inersia yang sudah didapatkan pada simulasi aliran daya. Setelah semua data yang di butuhkan telah didapatkan maka nilai tersebut di masukan pada program utama yang telah dirancang menggunakan software MATLAB. Berikut adalah hasil simulasi perhitungan nilai *critical clearing time*.

```
>> CCT
Generator output power in p.u. Pm = 1.6300
Generator e.m.f. in p.u. E = 1.0624
bus-bar voltage in p.u. V = 0.9937
Reactance before Fault in p.u. X1 = 17.5252
Reactance during Fault in p.u. X2 = 33.4701
Reactance after Fault in p.u. X3 = 36.9733
Momen Inertia = 6.4
Critical clearing time = 0.569 sec.
```

Gambar 10. Nilai cct pada program utama yang dibuat pada software MATLAB.

iv. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa perhitungan *critical clearing time* dengan menggunakan metode reduksi kron mampu menunjukkan waktu pemutusan kritis = 0.569 sec pada bus 5 yang mengalami gangguan dan saluran yang memutus gangguan tersebut terdapat pada bus 5 dan bus 7.

v. Daftar Pustaka

[1] Kamdar R., Kumar M., Agnihotri G., “ Transient Stability Analysis and Endhancement of IEEE 9 Bus System”, Department of Electrical Engineering, MANIT, Bhopal, India, 2014.

[2] Kundur, Prabha. 1994. Power System Stability and Control. New York : McGrow- Hill.

[3] Sulistiawati, IB., Priyadi, A., Hafidz I., Ashari MI., “Analisa Critical Clearing Time Pada Kestabilan Transien Sistem Tenaga Listrik Akibat Kondisi Gangguan Tidak Seimbang ” Seminar Nasional Inovasi Dan Aplikasi Teknologi Di Industri, Malang, 2017.

[4] Degeneff RC., Moises R., Gutierrez., Vakilian M., “Nonlinear, Lumped Parameter Transformer Model Reduction Technique”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10. No. 2, April 1995.

[5] Ashraf SM., Rathore B., Chakrabarti S.,”Performance Analysis of Static Network Reduction Methods ” Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology Kampur, India.

[6] Grainger, J, j. And W.D. Stevenson, Jr. 1994. Power System Analysis. USA: McGraw-Hill Inc.

[7] IEEE, “Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants”, 1987. IEEE Std C37.106-1987.

[8] Saadat hadi, “Power Sytem Alaysis”, Milwaekee Schol of engineering, New York san Fransisco, Second edition 511.

[9] Eviningsih R.P., Priyadi A., Soedibjo, “Perhitungan CCT (*Critical Clearing Time*) Berbasis *Trajectory* Kritis Menggunakan Persamaan Simultan Pada Sistem Yang Terhubung dengan Smart Grid”, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.