

# Analisa Stabilitas Transien Sistem Tenaga Listrik Multi Mesin 11 Bus

Marselin Jamlaay

*Jurusan Teknik Elektro-Politeknik Negeri Ambon*

marselin90@gmail.com

**Abstract** - Transient stability analysis is a study of disturbances such as loss of generation, load switching and short circuit faults. When a disturbance occurs, the frequency on the machine experiences a deviation from the frequency. The purpose of this analysis is to determine whether the machine will return to synchronous frequency after a fault occurs. The analysis was carried out by building a 9 bus system consisting of three generators. To determine the stability of the system, three-phase disturbances were made on lines 4-9, near bus 4. The study results show that the system is stable when  $t_c = 0.4$  seconds, the generator on bus 10 and bus 11 produces a joint swing curve so that it is said to be stable if the disturbance is removed for 0.4 seconds. However, if  $t_c = 0.8$  seconds, the swing curves of the two generators spread so that the system is said to be unstable. Based on the calculation results of the critical CB trip time on each generator, the critical CB trip time on generator bus 11 is  $t_c = 0.5445$  seconds, and the critical CB trip time on generator bus 10 is  $t_c = 0.619$  seconds. Based on these results, it must be set that the CB for trip lines 4-9 is less than 0.5445 seconds so that the power curve does not separate and the system remains stable after the disturbance is gone.

**Keywords:** stability, transients, 9 bus system, critical time CB

**Abstrak** – Analisa stabilitas transien merupakan sebuah studi mengenai gangguan seperti hilangnya pembangkitan, pengalihan beban dan gangguan hubung singkat. Pada saat terjadi gangguan maka frekuensi pada mesin mengalami penyimpangan dari frekuensinya. Tujuan dari analisa ini adalah untuk menentukan apakah mesin akan kembali ke frekuensi sinkron setelah terjadi gangguan. Analisa dilakukan dengan membangun sistem 11 bus yang terdiri dari tiga generator. Untuk mengetahui stabilitas sistem dibuat gangguan tiga fasa pada line 4-9, di dekat bus 4. Hasil percobaan menunjukkan sistem stabil saat  $t_c = 0.4$  detik, generator pada bus 10 dan bus 11 menghasilkan kurva swing bersama sehingga dikatakan stabil jika gangguan dihilangkan 0.4 detik. Namun jika  $t_c=0.8$  detik, kurva swing kedua generator menyebar sehingga dikatakan sistem tidak stabil. Berdasarkan hasil perhitungan waktu kritis CB trip pada masing-masing generator diperoleh waktu kritis CB trip pada generator bus 11 adalah  $t_c= 0.5445$  detik, dan waktu kritis CB trip pada generator bus 10 adalah  $t_c = 0.619$  detik. Berdasarkan hasil tersebut harus diatur CB untuk trip line 4-9 adalah kurang dari 0.5445 detik agar kurva daya tidak terpisah dan sistem tetap stabil setelah gangguan hilang.

**Kata kunci:** stabilitas, transien, sistem 9 bus, waktu kritis CB

## I. PENDAHULUAN

Penyaluran energi listrik dikatakan handal jika Sistem Tenaga Listrik (STL) mampu mempertahankan kestabilannya jika terjadi gangguan. Gangguan yang terjadi dalam sistem tentu berpengaruh terhadap pengoperasian pembangkit. Gangguan yang disebabkan karena hubung singkat atau perubahan beban secara mendadak berdampak pada kestabilan putaran mesin. Jika daya mekanik pada poros penggerak mula tidak dapat menyesuaikan dengan perubahan daya listrik pada beban dampaknya adalah frekuensi dan tegangan akan menyimpang [1]. Pelepasan beban akibat gangguan atau perbaikan jaringan juga berdampak pada kestabilan STL. Proses alih hubung (*switching*) menyebabkan kestabilan transien pada jaringan yang berpengaruh pada pengoperasian sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik yang handal yaitu sistem tenaga listrik yang dapat melayani beban secara kontinu tegangan dan frekuensi yang konstan. Besar tegangan dan frekuensi harus berada pada batas toleransi yang diijinkan sehingga peralatan listrik yang terpasang bekerja dengan baik. Jika terjadi perubahan pada tegangan dan frekuensi pada sistem maka periode peralihan yang singkat ini disebut *transien*. Sehingga diperlukan analisa sistem tenaga listrik untuk menentukan sistem stabil atau tidak jika terjadi gangguan. Stabilitas transien didasarkan pada kondisi ayunan pertama (*first swing*) dengan periode waktu kurang dari satu detik [2]. Pada penelitian ini dilakukan analisa stabilitas transien untuk sistem 11 bus yang terdapat lebih dari satu mesin pembangkit. Digunakan studi aliran daya pada aplikasi MATLAB untuk memperoleh data yang digunakan menghitung waktu kritis dan sudut kritis pemutusan CB. Kurva ayunan merupakan alat evaluasi kestabilan sistem yang digunakan untuk kestabilan transien.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

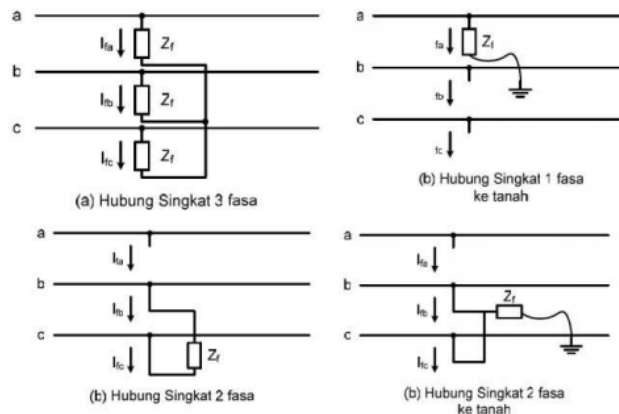
Keseimbangan daya antara beban dan pembangkit merupakan salah satu ukuran kestabilan operasi sistem tenaga listrik. Prinsipnya pasti selalu terjadi perubahan kapasitas beban dan letak beban sehingga pembangkit harus menyesuaikan daya yang dibangkitkan melalui kendali governor maupun eksitasi mengikuti perubahan beban sistem. Jika tidak ada pengaturan upada penggerak mula atau *prime mover* dan arus eksitasi maka akan menyebabkan keseimbangan daya pada sistem tenaga listrik terganggu dan efisiensi pengoperasian sistem menurun. Oleh karena itu kestabilan mesin pembangkit tergantung pada kendalinya. Sistem kendali yang handal adalah sistem yang mampu beroperasi normal mengikuti perubahan-perubahan yang terjadi dalam sistem. Jika semua mesin pembangkit tetap beroperasi normal meski terjadi gangguan, maka sistem dikatakan stabil.

Sistem tenaga listrik terdiri dari banyak unit pembangkit yang terhubung saluran interkoneksi untuk melayani beban. Tujuan dari sistem saluran interkoneksi adalah untuk menjaga kontinuitas dan ketersediaan tenaga listrik terhadap kebutuhan beban yang semakin bertambah. Namun semakin kompleksnya sistem tenaga listrik semakin rentan dengan ketidakstabilan akibat gangguan. Stabilitas sistem tenaga listrik adalah kemampuan tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi dan keseimbangan dalam sistem.

Berdasarkan sifat gangguan masalah stabilitas sistem tenaga listrik dibedakan atas: stabilitas tetap (*steady state*), stabilitas peralihan (*transient*), stabilitas sub peralihan (*dynamism*) [3].

1. Stabilitas *steady state* merupakan keadaan sistem tenaga listrik mencapai kondisi stabil pada kondisi operasi baru yang sama atau identic dengan kondisi sebelum terjadi gangguan setelah sistem mengalami gangguan kecil.
2. Stabilitas *transient* adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron (sebelum terjadi aksi dari kontrol governor) yang mengikuti gangguan pada sistem.
3. Stabilitas *dynamism* adalah kemampuan sistem untuk tetap pada kondisi sinkron setelah ayunan pertama (periode stabilitas transien) hingga sistem mencapai kondisi equilibrium *steady state* yang baru.

Pada suatu operasi sistem daya terkadang sistem mengalami gangguan hubung singkat yang dapat menyebabkan sistem tidak beroperasi secara seimbang. Adapun gangguan-gangguan pada sistem tiga fasa yaitu: hubung singkat 3 fasa, hubung singkat 1 fasa ke tanah, hubung singkat 2 fasa, hubung singkat 2 fasa ke tanah.



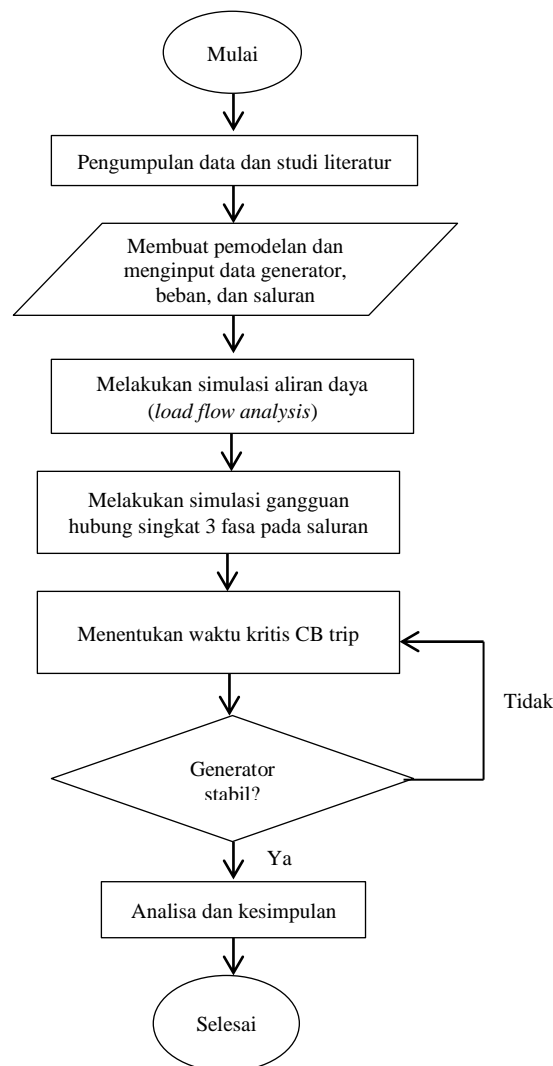
Gambar 1. Jenis-jenis gangguan hubung singkat

### 2.2. Stabilitas Transient

Stabilitas transien merupakan kemampuan dari sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangan besar yang bersifat mendadak selama sekitar satu "swing" dengan asumsi AVR (pengatur tegangan) dan governor belum bekerja. Masalah kestabilan transien dapat dibagi dalam kestabilan ayunan pertama (*first swing*) dan ayunan majemuk (*multiswing*). Kestabilan ayunan perama didasarkan pada model generator yang cukup sederhana tanpa memasukan sistem pengaturannya. Biasanya periode waktu yang diselidiki adalah ayunan pertama setelah timbul gangguan pada sistem [4]. Setelah periode ini, governor akan mulai bereaksi biasanya kurang dari lima detik sehingga stabilitas dinamis akan efektif. Ayunan dinamis juga dipengaruhi oleh osilasi tegangan, penguatan pada sistem eksitasi, dan waktu pada frekuensi jaringan.

## III. METODE

Penelitian dilakukan pada sistem 11 bus yang terdiri atas tiga mesin pembangkit. Pemodelan dilakukan pada matlab. Matlab merupakan program yang menggunakan bahasa pemrograman untuk komputasi teknik. Permasalahan dan pemecahannya dilakukan dalam bentuk notasi matematika. Secara umum kegunaan program matlab adalah untuk matematika komputasi, pengembangan algoritma, pemodelan, simulasi, pembuatan prototype, analisa data, eksplorasi, visualisasi, serta pembuatan aplikasi berbasis pembuatan *graphical user interface*. Berikut ini prosedur penelitian:

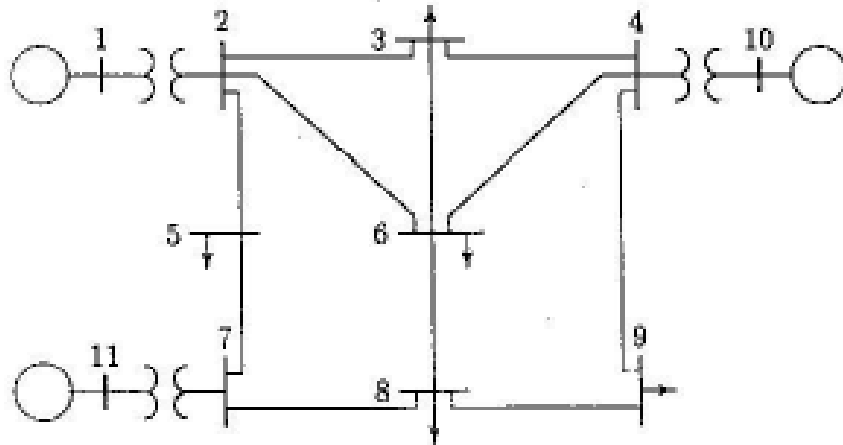


**Gambar 2.** Prosedur kerja penelitian

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1. Hasil

Model sistem tenaga listrik multi mesin 11 bus terdiri atas tiga mesin sebagai pembangkit daya (generator), lima feeder dan empat belas saluran. *Single line diagram* sistem 11 bus digambarkan sebagai berikut.



Gambar 3. *Single line diagram* sistem multi mesin 9 bus

Berdasarkan *single line diagram* tersebut maka tabel berikut menampilkan data pembangkit, data beban, dan data saluran.

Tabel 1. Data Pembangkit

Bus No.	Pembangkit	Ra	X'd	H	Voltage Mag (PU)	Generation (MW)	Mvar Limits	
							Min	Max
1	Generator 1	0.00	0.20	12	1.040			
10	Generator 2	0.00	0.15	10	1.035	200	0	180
11	Generator 3	0.00	0.25	9	1.030	160	0	120

Tabel 2. Data Beban

Bus No	MW	MVAr
3	150	120
5	120	160
6	140	90
8	110	90
9	80	50

Tabel 3. Data Saluran

Bus n <sub>a</sub>	Bus n <sub>b</sub>	R	X	1/2B
		p.u	p.u	p.u
1	2	0.000	0.006	0.000
2	3	0.008	0.030	0.004
2	5	0.004	0.015	0.002
2	6	0.012	0.045	0.005
3	4	0.010	0.040	0.005
3	6	0.004	0.040	0.005
4	6	0.015	0.060	0.008
4	9	0.018	0.070	0.009
4	10	0.000	0.008	0.000
5	7	0.005	0.043	0.003
6	8	0.006	0.048	0.000
7	8	0.006	0.035	0.004
7	11	0.000	0.010	0.000
8	9	0.005	0.048	0.000

Selanjutnya adalah melakukan analisis aliran daya untuk menentukan magnitude tegangan dan sudut fasa, menggunakan base MVA = 100 MVA, accuracy =0.0001, acceleration =1.6, dan max iterasi =100. Hasil simulasi diperoleh sebagai berikut:

```

basemva = 100; accuracy = 0.0001; accel = 1.6; maxiter = 100;

% IEEE 9-BUS TEST SYSTEM (American Electric Power)
% Bus Bus Voltage Angle ---Load--- -----Generator----- Injected
% No code Mag. Degree MW Mvar MW Mvar Qmin Qmax Mvar
busdata=[1 1 1.040 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0
2 0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0
3 0 1.0 0.0 150.0 120.0 0.0 0.0 0 0 0
4 0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0
5 0 1.0 0.0 120.0 60.0 0.0 0.0 0 0 0
6 0 1.0 0.0 140.0 90.0 0.0 0.0 0 0 0
7 0 1.0 0.0 110.0 90.0 0.0 0.0 0 0 0
8 0 1.0 0.0 80.0 50.0 0.0 0.0 0 0 0
9 0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0 0 0
10 2 1.035 0.0 0.0 0.0 200.0 0.0 0 180.0 0
11 2 1.030 0.0 0.0 0.0 160.0 0.0 0 120.0 0];

% Line code
% Bus bus R X 1/2 B = 1 for lines
% nl nr p.u. p.u. p.u. > 1 or < 1 tr. tap at bus nl
linedata=[1 2 0.000 0.006 0.000 1
2 3 0.008 0.030 0.004 1
2 5 0.004 0.015 0.002 1
2 6 0.012 0.045 0.005 1
3 4 0.010 0.040 0.005 1
3 6 0.004 0.040 0.005 1
4 6 0.015 0.060 0.008 1
4 9 0.018 0.070 0.009 1
4 10 0.000 0.008 0.000 1
5 7 0.005 0.043 0.003 1
6 8 0.006 0.048 0.000 1
7 8 0.006 0.035 0.004 1
7 11 0.000 0.010 0.000 1
8 9 0.005 0.048 0.000 1];

lfbus % form the bus admittance matrix
lfnewton % Power flow solution by Newton-Raphson method
Busout % Prints the power flow solution on the screen

% Gen. Ra Xd' H
gendata=[ 1 0 0.20 12
10 0 0.15 10
11 0 0.25 9 ];

trstab
  
```

**Gambar 4. Hasil simulasi load flow**

Berdasarkan hasil simulasi pada kondisi normal (sebelum gangguan) diperoleh tegangan internal generator E', initial sudut rotor δ<sub>0</sub>, dan daya maksimum yang dibangkitkan P<sub>m</sub>, sebagai berikut:

**Tabel 4. Hasil simulasi tegangan, sudut rotor, dan daya pada generator**

G (i)	E'(i)	d0(i)	P <sub>m</sub> (i)
1	1.527	17.9871	2.4483
10	1.2249	14.6959	2.0000
11	1.3560	16.3979	1.6000

Berdasarkan hasil tersebut dapat ditentukan daya output generator berdasarkan persamaan:

$$P_s = P_{max} \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \dots \dots \dots (1)$$

Sehingga dituliskan persamaan P<sub>em</sub> untuk generator bus 10 dan bus 11 (generator bus 1 sebagai referensi) sebagai berikut:

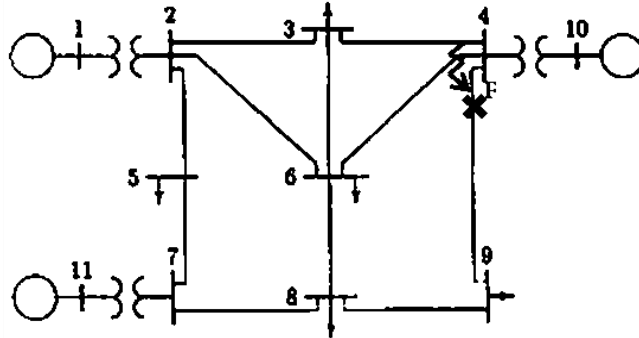
- Generator bus 10 : P<sub>s</sub> = 2 cos (θ<sub>10-1</sub>-δ<sub>10</sub>+δ<sub>1</sub>)

- Generator bus 11 :  $P_s = 1.6 \cos(\theta_{11-1} - \delta_{11} + \delta_1)$

Keterangan:

$\theta_{ij}$  adalah sudut admitansi polar  $Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij}$

Setelah diketahui persamaan generator bus 10 dan bus 11 selanjutnya dilakukan pengujian dengan memberikan gangguan tiga fasa pada saluran 4-9, dekat dengan bus 4.



Gambar 5. Gangguan 3 fasa pada saluran 4-9

Berikut ini adalah matriks  $Y_{bus}$  sebelum gangguan, selama gangguan dan setelah gangguan:

Prefault reduced bus admittance matrix

$Y_{bf} =$

0.4060 - 3.5129i	0.3943 + 1.3117i	0.2814 + 0.8211i
0.3943 + 1.3117i	0.6241 - 3.9201i	0.3110 + 0.9564i
0.2814 + 0.8211i	0.3110 + 0.9564i	0.2730 - 2.9065i

G(i)	E'(i)	d0(i)	Pm(i)
1	1.5247	17.9871	2.4483
10	1.2249	14.6959	2.0000
11	1.3560	16.3972	1.6000

Gambar 6. Matriks  $Y_{bus}$  sebelum gangguan

Faulted reduced bus admittance matrix

$Y_{df} =$

0.1614 - 4.2259i	0	0.0901 + 0.3017i
0	0 - 6.3291i	0
0.0901 + 0.3017i	0	0.1240 - 3.2846i

Gambar 7. Matriks  $Y_{bus}$  selama gangguan

Fault is cleared by opening a line. The bus to bus nos. of the line to be removed must be entered within brackets, e.g. [5, 7]  
Enter the bus to bus Nos. of line to be removed -> [4,9]

Postfault reduced bus admittance matrix

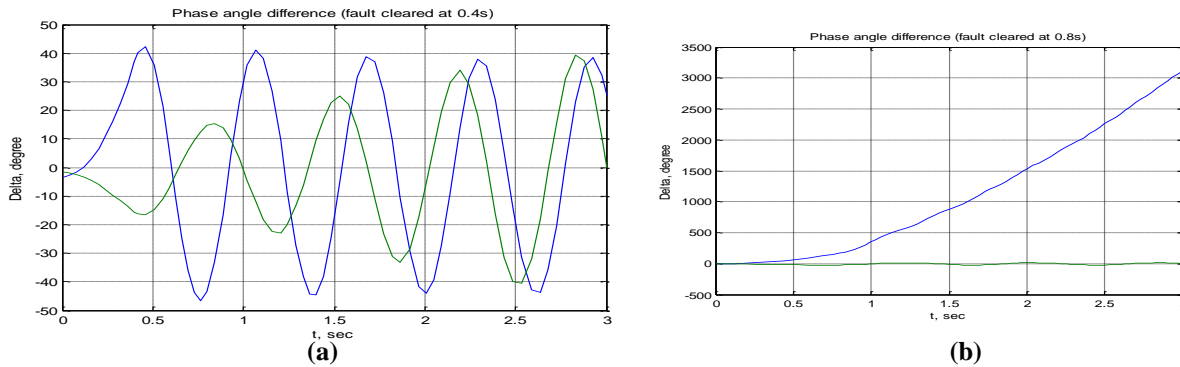
$Y_{af} =$

0.4083 - 3.5142i	0.3793 + 1.2986i	0.2896 + 0.8248i
0.3793 + 1.2986i	0.6199 - 3.8034i	0.2976 + 0.8952i
0.2896 + 0.8248i	0.2976 + 0.8952i	0.2864 - 2.8781i

Gambar 8. Matriks  $Y_{bus}$  setelah gangguan

#### 4.2. Pembahasan

Gangguan hubung singkat tiga fasa dilakukan untuk menentukan waktu trip CB dengan mengatur waktu pemutusan yang tepat pada saluran sebelum sistem menjadi tidak stabil. Waktu CB sebelum sistem menjadi tidak stabil adalah *critical fault clearing time*. Dapat dilihat pada gambar, ketika terjadi hubung singkat tiga fasa ke tanah maka setelah CB dibuka/trip saat 0.4 detik sistem stabil karena kurva swing generator bus 10 dan generator bus 11 mengumpul. Namun jika CB trip saat 0.8 detik sistem tidak stabil ditandai dengan kedua kurva swing generator menyebar.



**Gambar 11. Kurva swing generator bus 10 dan generator bus 11**

(a)  $t_c = 0.4$  detik, (b)  $t_c = 0.8$  detik

Berdasarkan hasil simulasi ditentukan *critical fault clearing time* pada CB menggunakan rumus matematis sebagai berikut:

- Generator bus 10 :  $P_{s10} = 2 \cos (73.27- 14.6959+17.9871)$   
 $P_{s10} = 0.4648$
- Generator bus 11 :  $P_{s11} = 1.6 \cos (71.08-16.3972+17.9871)$   
 $P_{s11} = 0.4766$

Selanjutnya menghitung sudut dan waktu kritis pada CB (untuk generator bus 10):

$$\delta_{o10} = 14.6959^\circ = 0.2565 \text{ rad} \text{ sehingga } \delta_{\max 10} = 180^\circ - \delta_{o10} = 165.3041^\circ = 2.8851 \text{ rad}$$

dan diperoleh sudut kritis daya sebagai berikut:

$$\cos \delta_{c10} = \frac{P_{s10}}{P_{\max 10}} (\delta_{\max 10} - \delta_{o10}) + \cos \delta_{\max 10}$$

$$\cos \delta_{c10} = \frac{0.4648}{2} (2.8851 - 0.2565) + \cos 165.3041$$

$$\cos \delta_{c10} = -0.356$$

$$\delta_{c10} = 110.879^\circ = 1.9352 \text{ rad}$$

Dengan waktu kritis:

$$t_{c10} = \sqrt{\frac{2H_{10}(\delta_{c10} - \delta_{o10})}{\pi f_o P_{s10}}} = \sqrt{\frac{(2)(10)(1.9352 - 0.2565)}{(\pi)(60)(0.4648)}} = \mathbf{0.619 \text{ s}}$$

sedangkan sudut dan waktu kritis pada CB (untuk generator bus 11):

$$\delta_{o11} = 16.3972^\circ = 0.2862 \text{ rad} \text{ sehingga } \delta_{\max 11} = 180^\circ - \delta_o = 163.6028^\circ = 2.8554 \text{ rad}$$

dan diperoleh sudut kritis daya sebagai berikut:

$$\cos \delta_{c11} = \frac{P_{s11}}{P_{\max 11}} (\delta_{\max 11} - \delta_{o11}) + \cos \delta_{\max 11}$$

$$\cos \delta_{c11} = \frac{0.4766}{1.6} (2.8554 - 0.2862) + \cos 163.6028$$

$$\cos \delta_{c11} = -0.194$$

$$\delta_{c11} = 101.1879^\circ = 1.76606 \text{ rad}$$

Dengan waktu kritis:

$$t_{c11} = \sqrt{\frac{2H_{11}(\delta_{c11} - \delta_{o11})}{\pi f_o P_{s11}}} = \sqrt{\frac{(2)(9)(1.76606 - 0.2862)}{(\pi)(60)(0.4766)}} = \mathbf{0.5445s}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut waktu kritis  $t_c$  yang harus disetting pada CB untuk trip di line yang terganggu yaitu line 4-9 harus kurang dari 0.5445 detik agar kurva daya-nya tidak terpisah dan sistem tetap stabil

## V. PENUTUP

Dari penelitian yang dilakukan berdasarkan hasil simulasi stabilitas transien pada sistem multi mesin 11 bus dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Apabila kurva osilasi sudut rotor (kurva swing) untuk generator bus 10 dan bus 11 mengumpul, menunjukkan bahwa sistem ini stabil, kurva  $t_c = 0.4$  detik menunjukkan kedua generator menghasilkan kurva swing bersama. Sehingga dapat dikatakan sistem stabil jika gangguan dihilangkan 0.4 detik.
2. Sedangkan kurva swing pada sistem yang tidak stabil ditandai dengan bentuk kurva kedua generator yang menyebar, misalnya ketika  $t_c = 0.8$  detik, sudut rotor pada generator bus 10 meningkat menjauhi sudut rotor generator bus 11.
3. Berdasarkan perhitungan ditemukan waktu kritis  $t_c$  pada masing-masing generator.
4.  $t_c$  pada generator bus 11 sekitar 0.5445 detik, sedangkan pada generator bus 10 sekitar 0.619 detik. Sehingga waktu kritis  $t_c$  yang harus disetting pada CB untuk trip di line yang terganggu yaitu line 4-9 harus kurang dari 0.5445 detik agar kurva daya-nya tidak terpisah dan sistem tetap stabil.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. H. Rio Parohon Tua Tambunan, Karnoto, "Simulasi Pelepasan Beban (Load Shedding) pada Sistem Jaringan Distribusi Tragi Sibolga 150/20 KV (Studi Kasus pada Penyulang Tragi Sibolga, SUMUT)," *TRANSIENT*, vol. 3, no. 2, pp. 2302–9927, 2014, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/transient/article/view/5508>
- [2] A. Hasibuan, "Analisis Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Single Mesin Menggunakan Metode Runge Kutta Orde 4," *J. Elektro dan Telekomunikasi*, vol. Vol 4, no. No. 2, p. 24, 2017.
- [3] A. R. Priawan *et al.*, "Analisis stabilitas transient sistem tenaga listrik pada pt. kebon agung malang," pp. 1–6, 2015.
- [4] H. T. James A. Pongtiku, Maickel Tuegeh, "Analisa Stabilitas Transien Untuk Menentukan Waktu Pemutusan Kritis (Critical Clearing Time) Pada Jaringan Transmisi 70 Kv Plta Tanggari Ii-Gi Sawangan Dengan Menggunakan Program Matlab," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 3, no. 2, pp. 53–58, 2014.