

ANALISIS KINERJA GENERATOR PADA STUDI PENYAMBUNGAN PEMBANGKIT LITRIK TENAGA MINIHIDRO (PLTM) DENGAN JALA-JALA

Suslamet^{*}), Mochammad Facta dan Enda Wista Sinuraya

Program Studi Sarjana Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*}E-mail: Suslamet988@gmail.com

Abstrak

Critical clearing time (CCT) sangat penting terhadap kestabilan sistem kelitrikan akibat adanya gangguan. Sistem kelitrikan akan stabil apabila gangguan dihilangkan dibawah nilai waktu pemutusan kritisnya dan sebaliknya sistem tidak stabil. Nilai CCT diperoleh dengan metode kriteria luas sama dan time domain simulation (TDS) pada software ETAP. Nilai CCT dengan metode kriteria luas tidak mempertimbangkan adanya respon governor dan AVR. Sedangkan dengan metode trial error menggunakan TDS lebih akurat karena mempertimbangkan respon governor dan AVR dengan cara mengamati respon sudut rotor dalam range stabil dan tidak stabil pada waktu tertentu. Selain menentukan nilai CCT dalam studi penyambungan perlu dilakukan analisis kondisi sistem kelitrikan PLN apabila PLTM Kambangan tersambung dengan jala-jala. Analisis kinerja generator dengan mempertimbangkan AVR dan Governor. Kestabilan transien dengan mengamati respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan pada pembangkit PLTM Kambangan. Dengan adanya PLTM Kambangan dapat memperbaiki sistem kelitrikan yang ada. Nilai CCT dengan metode kriteria luas sama pada tiga titik gangguan diperoleh 0,233 detik di Keluaran Penyulang Batang-10, titik D 0,231 detik terletak 2,04 km dan titik E 0,230 detik yang terletak 0,8 km dari Power House. Dengan TDS yakni rentang 0,400-0,401 detik di Batang-10, 0,282-283 detik di titik D dan 0,268-269 detik di titik E.

Kata kunci: waktu pemutusan kritis (CCT), circuit breaker (CB), analisis stabilitas transien, gangguan hubunng singkat, software ETAP 16.0.

Abstract

Critical clearing time (CCT) is very important for stability electrical system due to disturbances. The electrical system will be stable if the disturbance is removed below its critical disconnection time value and otherwise the system is unstable. The CCT value was obtained by using the same area criteria and time domain simulation (TDS) in ETAP software. The CCT value using the broad criteria method does not consider the governor and AVR. Meanwhile, the trial error method using TDS is more accurate because it considers the response of the governor and AVR by observing the rotor angle response in a stable and unstable range at a certain time. In addition to determining the CCT value in the connection study, it is necessary to analyze the condition of the PLN electricity system if the PLTM Kambangan is connected to the grid. Generator performance analysis by considering AVR and Governor. Transient stability by observing the response of the rotor angle, frequency and voltage at the generator PLTM Kambangan. With the PLTM Kambangan, it can improve the existing electricity system. The CCT value using the same area criteria method at three fault points was obtained at 0.233 seconds at the Batang-10 Feeder Output, Titik D 0.231 seconds located 2.04 km and Titik E 0.230 seconds located 0.8 km from the Power House. With TDS, which is a range of 0.400-0.401 seconds at Batang-10, 0.282-283 seconds at Titik D and 0.268-269 seconds at Titik E.

Kata kunci: Critical clearing time (CCT), circuit breaker (CB), transient stability analysis, short circuit fault, ETAP software.

1. Pendahuluan

PLTM adalah salah satu pembangkit listrik berskala kecil dengan memanfaatkan tenaga air sebagai sebagai penggerakannya [1]. Energi listrik sangat penting untuk masyarakat, dengan memanfaatkan sungai atau aliran irigasi untuk membangun PLTM dapat menambah

ketersediaan energi listrik sehingga dapat membantu masyarakat dan dapat menambah keandalan jaringan PLN [2]. Pembangkit listrik tenaga minihidro ini termasuk kedalam energi baru-terbarukan. Salah satu cara yang dapat dilakukan yaitu memanfaatkan aliran air sebagai sumber utama dalam pembangkitannya Energi listrik yang dihasilkan dengan memanfaatkan energi potensial dari aliran air dengan cara memanfaatkan tinggi jatuh air dan

debit air untuk memutar turbin. Turbin dan generator dipasang satu poros sehingga apabila turbin berputar maka rotor pada generator akan ikut berputar[3].

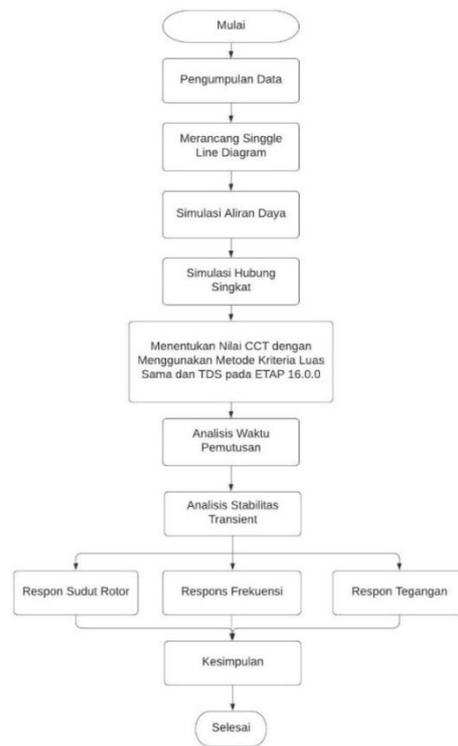
Pada PLTM Kambangan memanfaatkan air sungai kambangan sebagai energi primernya untuk menggerakkan turbin serta generator. PLTM kambangan berencana akan membangkitkan 2 generator dengan kapasitas 1750 kW per unit, yang rencananya akan di salurkan atau dihubungkan pada jaringan distribusi PLN 20 kV. Dari 2 generator ini akan dihubung parallel yang kemudian dihubungkan dengan jala-jala 20 kV. Kapasitas daya yang dibangkitkan oleh PLTM akan memasok beban yang sebelumnya di pasok oleh gardu induk batang pada saluran batang 10. PLTM ini dihubung on grid sehingga jika daya yang dibutuhkan oleh beban lebih besar dari pembangkit maka GI Batang akan mensuplay kekurangan daya yang dibutuhkan beban.

Salah satu masalah dalam penyambungan pltm pada grid yaitu tentang layak atau tidaknya suatu pembangkit kecil seperti PLTM jika di sambungkan dengan jala-jala PLN. Oleh sebab itu perlu dilakukan suatu analisis kelayakan PLTM Kambangan berdasarkan keputusan direksi PT PLN (persero) tentang pedoman pembangkit energi terbarukan ke sistem distribusi PLN [4]. Sehingga hal tersebut menjadi salah satu alasan yang mendasar dalam perancangan sebuah pembangkit berupa PLTM yang baik agar memenuhi syarat yang ditentukan oleh PLN. Dalam melakukan perancangan PLTM agar sesuai dengan keputusan direksi PT PLN maka sebelumnya harus dilakukan stadi stabilitas sistem tenaga listrik seperti studi analisis perilaku unjuk kerja PLTM dalam hal ini turbin dan generator (AVR dan *governor*) yang sesuai sehingga layak dari segi teknis dibidang elektro dengan menganalisis keterserapan daya yang dibangkitkan oleh beban dan jala-jala, kestabilan sudut rotor, tegangan dan frekuensi untuk setiap perubahan beban dan manuver jaringan yang terjadi[5].

2. Metode Penelitian

2.1. Langkah Pengerjaan

Berikut ini langkah pengerjaan yang akan dilakukan dalam penelitian, Langkah-langkah tersebut dapat dilihat pada Gambar 1 diagram alir penelitian seperti pengumpulan data primer dan sekunder, merancang *single line diagram* pada ETAP dan visio, analisis aliran daya, analisis hubung singkat, analisis kestabilan transien dan menentukan waktu pemutusan kritis. Cara yang dilakukan untuk pengujian waktu pemutusan kritis suatu sistem kelistrikan PLTM Kambangan yaitu dengan menggunakan dua metode yaitu metode pertama kriteria luas sama dan metode kedua *step-by-step* menggunakan modul *transient stability sistem* dengan mengamati respon sudut rotor pada waktu sistem stabil dan tidak stabil, respon tegangan, respon frekuensi akibat gangguan



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2. Persamaan yang digunakan

2.2.1. Metode Kriteria sama luas

Metode yang dapat digunakan untuk memprediksi stabilitas sistem tenaga listrik salah satunya adalah metode kriteria luas sama. Metode ini hanya bisa digunakan untuk memprediksi suatu sistem satu mesin yang terhubung ke *infinite bus*. Persamaan yang dapat digunakan untuk menurunkan metode ini sebagai berikut [6]:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_m - P_e = P_a \quad \text{per unit} \quad (1)$$

Dengan P_a adalah daya percepatan, dari persamaan diatas dapat diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\frac{d\delta^2}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (2)$$

Kemudian jika kedua sisi dari persamaan dikalikan dengan $2 \frac{d\delta}{dt}$, maka didapatkan:

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d\delta^2}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (4)$$

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f}{H} (P_m - P_e) d\delta \quad (5)$$

Jika diintegrasikan dari kedua sisi kiri dan kanan sehingga diperoleh:

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{2\pi f}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (6)$$

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right) = \sqrt{\frac{2\pi f}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (7)$$

Apabila kecepatannya menjadi nol sesaat setelah gangguan, maka didapatkan persamaan kriteria luas sama:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_k} (P_m - P_e) d\delta \quad (8)$$

Sudut pemutusan kritis δ_k ini dapat dicari menggunakan kriteria luas sama dengan persamaan:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_k} P_m d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_k} (P_{mak} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (9)$$

Persamaan diatas dengan mengintegrasikan kedua sisi kiri dan kanan diperoleh:

$$P_m(\delta_k - \delta_0) = P_{mak}(\cos \delta_k - \cos \delta_{mak}) - P_m(\delta_{mak} - \delta_k) \quad (10)$$

$$\cos \delta_k = \frac{P_{in}}{P_{mak}}(\delta_{mak} - \delta_k) + \cos \delta_{mak} \quad (11)$$

Untuk menentukann waktu pemutusan kritis diperlukan persamaan *non-linear*, dimana daya listrik selama gangguyan adalah nol, sehingga CCT dapat ditentukan. Sehingga waktu pemutusan kritis dapat ditentukan [7]:

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d\delta^2}{dt^2} = P_m \quad (12)$$

$$\frac{d\delta^2}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} P_m \quad (13)$$

Kemudian integrasi kedua sisi maka didapatkan:

$$\frac{d\delta^2}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} P_m \int_0^1 dt = \frac{\pi f}{H} P_m t \quad (14)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan diatas maka:

$$\delta = \frac{\pi f}{H} P_m t + \delta_0 \quad (15)$$

Dimana δ_k adalah sudut pemutusan kritis (CCA) berhubungan dengan waktu pemutusan kritis (CCT) yaitu[8]:

$$t_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{2\pi f P_m}} \quad (16)$$

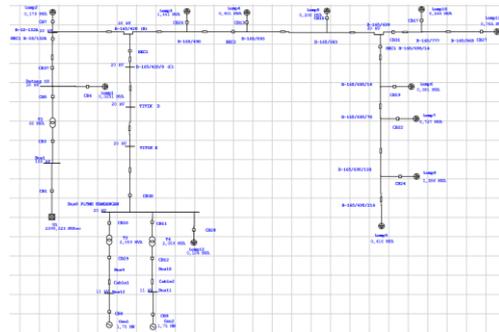
2.3. Kondisi Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi sistem kelistrikan ketika PLTM Kambangan dihubungkan pada jala-jala PLN dengan mempertimbangkan *power factor* (PF) dengan nilai 0,90 *lagging* dan 0,90 *leading*, frekuensi tetap terjaga pada 48,5-51 Hz dan tegangan 20 Kv (+5% dan -10%) yang mengacu pada standar penyambungan yang ditetapkan berdasarkan Keputusan Direksi PT PLN (PERSERO) tentang pedoman pembangkit energi

terbarukan ke sistem distribusi PLN pasal 25 dan pasal 26[9]. Selain itu dapatkan memperbaiki daya pada sistem kelistrikan yang ada. menentukan nilai CCT pada sistem kelistrikan yang baru, menganalisis kestabilan transien terhadap gangguan. Apakah nilai tegangan, frekuensi dan factor daya dapat diperbaiki jika PLTM dihubungkan pada jala-jala.

2.4. Data Penelitian

2.4.1. Single line diagram PLTM Kambangan



Gambar 2. Single line diagram PLTM Kambangan

2.4.2. Generator 1 dan 2

Generator satu dan dua yang digunakan pada PLTM Kambangan kapasitas dan jenis yang digunakan yaitu sama.

A. Rating generator

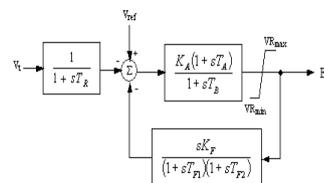
Rating	MW	kV	% PF	MVA	% ER	Poles
11 kV 1.75 MW Voltage Control	1.75	11	85	2.059	95	4
% Bus Nom kV	100	106.1	FLA	106.1	RPM	1500

Gen. Category	% V	Angle	MW	Mvar	% PF	Qmax	Qmin
1 Design	100	1.75				1.885	0
2 Normal	100	1.75				1.885	0
3 Shutdown	100	0				1.852	0
4 Emergency	100	0				1.852	0

Prime Mover Rating				Mvar Limits	
Continuous	Peak	Continuous	Peak	Capability Curve	Peak Mvar
2346.8	1.75	2346.8	1.75	<input checked="" type="radio"/> Capability Curve	1.085
				<input type="radio"/> User Defined	

Gambar 3. Data generator PLTM Kambangan

B. Exciter



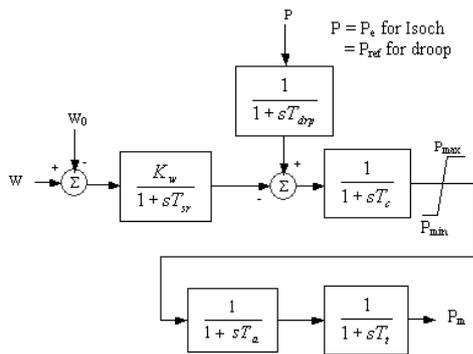
Gambar 4. Basler SR8F & SR125A Excitation Sistem (SR8F)

Berdasarkan model ekciter dan AVR pada gambar diatas maka diperlukan beberapa parameter, parameter *ekciter* seperti pada Gambar 5.



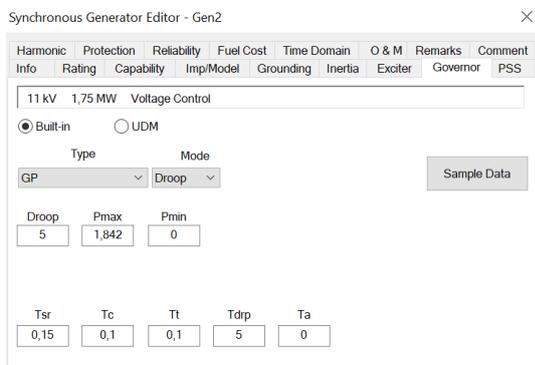
Gambar 5. Data *ekciter*

C. Governor



Gambar 6. General purpose governor

Berikut pada Gambar 6 yaitu parameter *governor* GP yang diperlukan dalam kinerjanya:



Gambar 6. Data *governor*



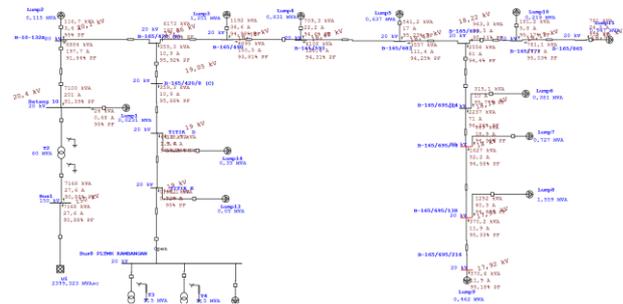
Gambar 7. Data *transformator* PLTM Kambangan

3. Hasil dan Analisis

3.1. Keterserapan daya yang dibangkitkan PLTM Kambangan

3.1.1. Keterserapan daya PLTM Kambangan saat kondisi WBP

Pada kondisi beban puncak saat dilakukan pengukuran pada penyulang Batang 10 yaitu sebesar 7,1 MVA dengan arus 201 A, tegangan sebesar 20,4 kV dan nilai pf sebesar 90%. Pada simulasi yang dibuat perlu dilakukan verifikasi data lapangan terhadap hasil keluaran daya pada software ETAP 16.0. Daya yang dikeluarkan penyulang Batang 10 agar sesuai dengan kondisi lapangan perlu dilakukan adanya *setting tapping transformator*. Dari hasil simulasi sesuai kondisi lapangan saat PLTM belum terpasang terdapat *under Voltage* pada ujung saluran yaitu bus B-165/695/138, B-165/695/216, B-165/695/78.

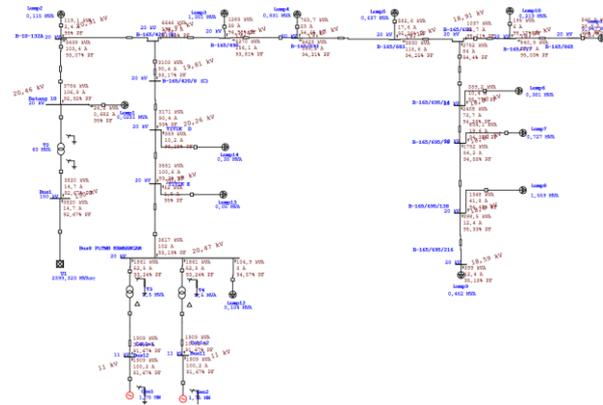


Gambar 8. Aliran Daya saat Kondisi WBP sebelum adanya PLTM Kambangan

Pada Gambar 9 ketika PLTM terhubung pada grid PLN daya yang disuplay GI Batang sebesar 3,784 MVA dengan arus 106,8 A, tegangan 20,46 Kv dan pf sebesar 92,92 Untuk pembangkit PLTM Kambangan itu sendiri mensuplay daya sebesar 3,617 MVA dengan arus, tegangan dan pf berurutan sebesar 102 A, 20,47 kV dan 93,19%.

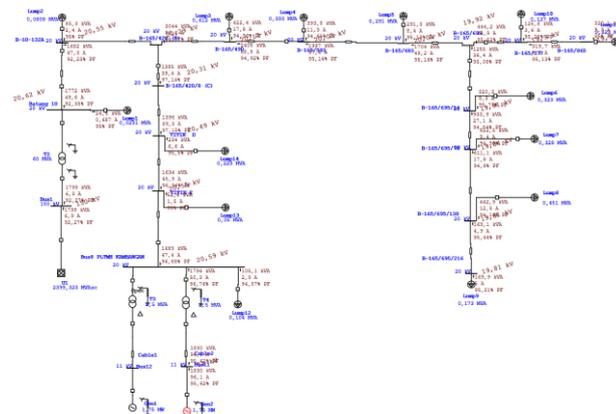
Tabel 1. Bus yang mengalami *under voltage*

Critical report						
Device ID	Kondisi	Rating	Unit	Operasi	% Operasi	Tipe
B165/695/78	<i>Under Voltage</i>	20	kV	18	90	3 fasa
B165/695/138	<i>Under Voltage</i>	20	kV	17,925	89,6	3 fasa
B165/695/216	<i>Under Voltage</i>	20	kV	17,92	89,6	3 fasa



Gambar 9. Aliran daya saat kondisi WBP setelah adanya PLTM Kambangan

3.1.2. Keterserapan daya PLTM Kambnagan saat kondisi LWBP



Gambar 10. Aliran daya saat kondisi LWBP setelah adanya PLTM Kambangan dengan satu pembangkit

Daya yang diserap beban saat kondisi luar beban waktu puncak pada kondisi sebenarnya dilapangan sebesar 3,4 MVA dengan arus, tegangan dan pf sebesar 95,3 A, 20,6 kV dan 94,12%. Pada kondisi luar waktu beban puncak sehingga tegangan dan pf terjaga pada operasi nominalnya serta tidak adanya daya balik menuju GI Batang PLTM Kambangan perlu mematkan salah satu dari kedua pembangkit (satu pembangkit aktif) atau dengan cara mengurangi daya yang dioperasikan dari kedua pembangkit. Ketika hanya salah satu pembangkit PLTM yang beroperasi maka daya yang disuplay GI Batang

sebesar 1,772 MVA dengan arus 49,6 A, tegangan 20,62 kV dan pf sebesar 92,35%. Untuk pembangkit PLTM Kambangan itu sendiri mensuplay daya sebesar 1,689 MVA dengan arus, tegangan dan pf berturut-turut sebesar 47,4 A, 20,59 kV dan 96,88%.

3.1.3. Summary aliran daya

Tabel 2. Perbandingan daya GI Batang dan PLTM Kambangan

Parameter	Waktu beban puncak		Luar beban waktu puncak	
	GI Batang (Batang 10)	PLTM Kambangan	GI Batang (Batang 10)	PLTM Kambangan
Daya (KVA)	3784	3617	1772	1689
Tegangan (kV)	20,46	20,47	20,62	20,59
Arus (A)	106,8	102	49,6	47,4
Powes factor (%)	92,92	93,19	92,35	96,88
Frekuensi (Hz)	50	50	50	50

3.2. Menentukan Nilai CCA dan CCT Berdasarkan Lokasi Titik Gangguan Hubung Singkat

3.2.1. Menentukan nilai momen inersia

Untuk menghitung nilai waktu pemutusan kritis diperlukan nilai momen inersia dari generator maka [10]:

$$H = \frac{MJ}{MVA} \tag{17}$$

Untuk standar inersia generator tenaga air menurut IEEE [11].

- Untuk speed <200 rpm nilai H=2-3 MJ_s⁻¹/MVA
- Untuk speed >200 rpm nilai H=2-4 MJ_s⁻¹/MVA

Maka dapat diasumsikan nilai inersia generator yang digunakan yaitu 4 MJ_s⁻¹/MVA, sehingga didapatkan nilai inersia pada generator PLTM Kambangan sebesar:

$$\begin{aligned} \frac{H_1}{4} &= \frac{MVA_2}{2,059} \\ \frac{H_2}{4} &= \frac{1}{2,059} \\ H_2 &= \frac{4}{2,059} = 1,943 \end{aligned}$$

Maka dari hasil perhitungan diatas nilai inersia generator sebesar 1,943 MJ_s⁻¹/MVA.

3.2.2. Nilai CCA dan CCT ketika terjadi gangguan pada batang 10

Reaktansi total saluran yaitu 0,2592

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{Pe - jQ}{V^*} = \frac{0,85 - j0,527}{1} = 0,85 + j0,527$$

$$E = V + jX I$$

$$E = 1,0 + 0,2592(0,85 + j0,527)$$

$$\begin{aligned}
 &= 1,0 + (0,2592 \angle 90^\circ \times 1 \angle -31,799^\circ) \\
 &= 0,2592 \angle 58,2^\circ + 1,0 \\
 &= 0,137 + j0,22 + 1,0 \\
 &= 1,137 + j0,22 \\
 &= 1,158 \angle 10,951^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e = P_{mak} \sin \delta &= \frac{|E' || V|}{X_{Sebelum}} \sin \delta \\
 &= \frac{(1,158)(1,0)}{0,2592} \\
 &= 4,467 \sin \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{maks} \sin \delta &= 0,85 \\
 4,467 \sin \delta &= 0,85
 \end{aligned}$$

$$\sin \delta = \frac{0,85}{4,467} = 0,191$$

$$\delta = 11^\circ = 0,191 \text{ rad}$$

$$\delta_{max} = 180^\circ - 11^\circ = 169^\circ = 2,94 \text{ rad}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \delta_c &= \frac{0,85}{4,467} (2,94 - 0,191) + \cos 169^\circ \\
 &= -0,456
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_c = \cos^{-1}(0,456) &= 117,13^\circ \\
 &= 2,044 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_c &= \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 \cdot P_m}} \\
 t_c &= \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 \cdot P_m}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 1,943(2,044 - 0,943)}{\pi \times 50 \times 0,85}} = \sqrt{\frac{7,2}{133,45}} \\
 &= 0,233 \text{ dtk}
 \end{aligned}$$

Jadi waktu pemutusan kritis akibat adanya gangguan hubung singkat 3 fasa di batang adalah 0,233 dtk

3.2.3. Nilai CCA dan CCT ketika terjadi gangguan pada Titik D

Reaktansi sebelum terjadi gangguan adalah 0,2108 pu
Reaktansi selama gangguan adalah 0,0336 pu

$$\begin{aligned}
 P_{2mak} \sin \delta &= \frac{|E' || V|}{X_{Selama\ gangguan}} \sin \delta \\
 &= \frac{(1,158)(1,0)}{0,0336} \\
 &= 34,464 \sin \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{3max} \sin \delta &= \frac{|E' || V|}{X_{Setelah\ gangguan}} \sin \delta \\
 &= \frac{(11,11)(0)}{X_{Selama\ gangguan}} = 0 \sin \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{max} &= 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{0,85}{34,464} \right) = 178,6^\circ \\
 &= 3,117 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \delta_c &= \frac{P_m(\delta_{max} - \delta_0) + P_{3max} \cos \delta_{max} - P_{2max} \cos \delta_0}{P_{3max} - P_{2max}} \\
 &= \frac{0,85}{4,467} (3,117 - 0,191) + 0 - 30,473 \cos 11^\circ
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \delta_c &= \frac{0,85}{4,467} (3,117 - 0,191) + 0 \cos 178,4^\circ - 34,473 \cos 11^\circ \\
 &= \frac{0 - 34,473}{0 - 34,473}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \delta_c &= -0,426 \\
 \delta_c &= 115,22^\circ = 2,011 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_c &= \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 \cdot P_m}} t_c = \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 \cdot P_m}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 1,943(2,011 - 0,191)}{\pi \times 50 \times 0,85}} = \sqrt{\frac{7,073}{133,45}} \\
 &= 0,231 \text{ dtk}
 \end{aligned}$$

Jadi nilai waktu pemutusan kritis ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa di titik D adalah 0,231 dtk.

3.2.4. Nilai CCA dan CCT ketika terjadi gangguan pada Titik E

Reaktansi sebelum terjadi gangguan adalah 0,2108 pu
Reaktansi selama gangguan adalah 0,038 pu

$$\begin{aligned}
 P_{2mak} \sin \delta &= \frac{|E' || V|}{X_{Selama\ gangguan}} \sin \delta \\
 &= \frac{(1,158)(1,0)}{0,038} \\
 &= 30,473 \sin \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{3max} \sin \delta &= \frac{|E' || V|}{X_{Setelah\ gangguan}} \sin \delta \\
 &= \frac{(11,11)(0)}{X_{Selama\ gangguan}} = 0 \sin \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \delta_{max} &= 180^\circ - \sin^{-1} \left(\frac{0,85}{30,473} \right) = 178,4^\circ \\
 &= 3,113 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \delta_c &= \frac{P_m(\delta_{max} - \delta_0) + P_{3max} \cos \delta_{max} - P_{2max} \cos \delta_0}{P_{3max} - P_{2max}} \\
 &= \frac{0,85}{4,467} (3,113 - 0,191) + 0 - 30,473 \cos 11^\circ \\
 \cos \delta_c &= \frac{0 - 30,473}{0 - 30,473}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \cos \delta_c &= -0,425 \\
 \delta_c &= 115,15^\circ = 2,0097 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t_c &= \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 \cdot P_m}} \\
 t_c &= \sqrt{\frac{2H(\delta_c - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 \cdot P_m}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 1,943(2,0097 - 0,191)}{\pi \times 50 \times 0,85}} = \sqrt{\frac{7,06}{133,45}} \\
 &= 0,230 \text{ dtk}
 \end{aligned}$$

Jadi waktu pemutusan kritis ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa menggunakan metode luas sama pada titik E adalah 0,230 dtk.

Berikut ini ringkasan perhitungan nilai CCT menggunakan metode kriteria luas sama seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai CCT

Lokasi Gangguan	CCA (Derajat)	CCT (Dtk)
Batang 10	117,13	0,233
Titik D	115,22	0,231
Titik E	115,15	0,230

3.3. Analisis Transient

3.3.1. Nilai CCT ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa

Nilai CCT selain menggunakan metode kriteia luas sama juga dapat diperoleh dengan metode *step-by-step* pada TDS ETAP dengan cara mengamati respon dari sudut rotor saat sistem stabil dan tidak stabil [12].

- A. Nilai CCT ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa Batang 10

Tabel 4. Nilai CCT ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada batang 10

Kasus	Nilai CCT	
	Generator 1	Generator 2
AVR dan Governor OFF	0,353-0,354	0,371-0,372
AVR ON dan Governor OFF	0,377-0,378	0,377-0,378
AVR OFF dan Governor ON	0,373-0,374	0,388-0,389
AVR dan Governor ON	0,400-0,401	0,409-0,410

Tabel 3 diatas menunjukkan waktu pemutusan kritis apabila terjadi gangguan 3 fasa pada penyulang batang 10 sangat jauh dari sumber pembangkit PLTM Kambangan dengan nilai arus hubung singkat sebesar 13,121 KA.

- B. Nilai CCT ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa Titik D

Tabel 5. Nilai CCT ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada Titik D

Kasus	Nilai CCT	
	Generator 1	Generator 2
AVR dan Governor OFF	0,265-0,266	0,271-0,272
AVR ON dan Governor OFF	0,273-0,274	0,273-0,274
AVR OFF dan Governor ON	0,275-0,276	0,279-0,280
AVR dan Governor ON	0,282-0,283	0,285-0,286

Tabel 5 diatas menunjukkan waktu pemutusan kritis apabila terjadi gangguan 3 fasa pada titik D atau tengah saluran dengan nilai arus hubung singkat sebesar 1,934 KA.

- C. Nilai CCT akibat adanya gangguan hubung singkat 3 fasa titik E

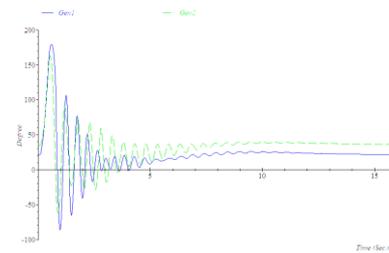
Tabel 6. Nilai CCT ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada titik E

Kasus	Nilai CCT	
	Generator 1	Generator 2
AVR dan Governor OFF	0,353-0,354	0,371-0,372
AVR ON dan Governor OFF	0,377-0,378	0,377-0,378
AVR OFF dan Governor ON	0,373-0,374	0,388-0,389
AVR dan Governor ON	0,400-0,401	0,409-0,410

Tabel 6 diatas menunjukkan waktu pemutusan kritis apabila terjadi gangguan 3 fasa pada titik E dekat sumber pembangkit dengan nilai arus hubung singkat sebesar 1,842 KA.

3.3.2. Respon sudut rotor, tegangan, dan frekuensi akibat adanya hubung singkat selama 0,4 dtk

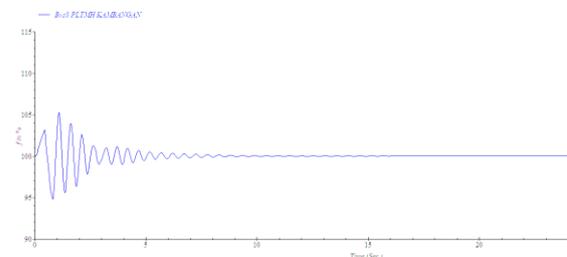
- A. Respon sudut rotor



Gambar 11. Respon sudut rotor

Dapat dilihat pada gambar 11 ketika terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa selama 0,4 dtk kedua generator mengalami osilasi yang cukup tinggi namun dapat kembali ke posisi *steady state* pada dtk 12,31 dtk.

- B. Respon frekuensi

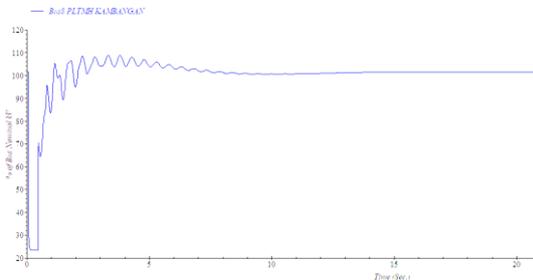


Gambar 12. Respon frekuensi

Pada Gambar 12 menunjukkan Frekuensi mengalami osilasi terendah sebesar 94,758% dan osilasi tertinggi dengan nilai 105,227%. Terjadinya Fluktuasi masih

berada pada ambang batas yang diizinkan berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-1987 dan menurut Standar SPLN frekuensi yang di pergunakan di Indonesia berkisar antara 49,5 Hz- 50,5 Hz ($\pm 10\%$)[13].

C. Respon tegangan

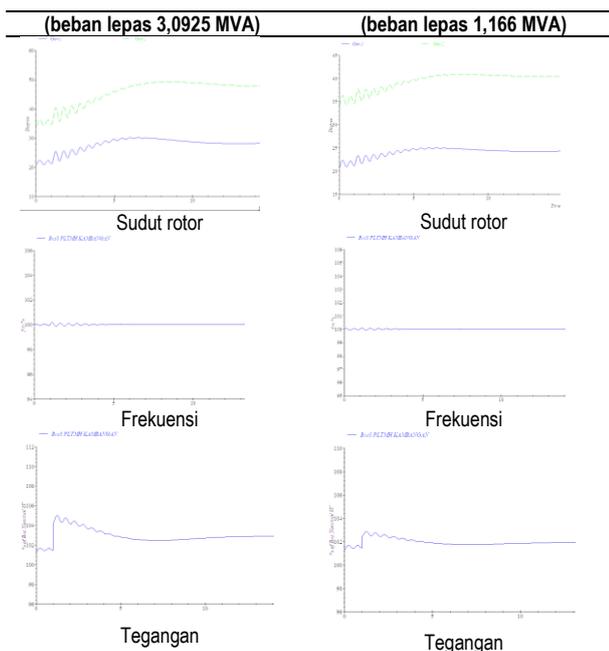


Gambar 13. Respon tegangan

Pada Gambar 13 menunjukkan respon tegangan sistem mengalami *fluktuasi* selama terjadi gangguan sebesar 22,83% dan setelah dibersihkan fluktuasi dengan nilai tertinggi 106,899 % dan nilai terendah 64,487% kemudian sistem akan Kembali pada tegangan nominalnya. *Voltage swells* dan *voltage sag* yang terjadi pada sistem kelistrikan ini melewati batas nominal yang diizinkan, menurut standar IEE 1159-195 durasi dari *voltage sag* dan *voltage swell* selama tidak melebihi waktu 3 dtk maka masih diizinkan atau diperbolehkan[14].

3.3.3. Respon sudut rotor, tegangan, dan frekuensi akibat adanya perubahan beban

Tabel 7. Respon sudut rotor, frekuensi dan tegangan adanya perubahan beban



Dari Tabel 7 dapat dilihat semakin besar perubahan bebannya maka osilasi terhadap sudut rotor, frekuensi dan tegangan sistem akan semakin besar. Tegangan pada sistem apabila beban semakin besar maka tegangannya semakin mengecil dan sebaliknya pada bus PLTM Kambangan[15].

4. Kesimpulan

PLTM Kambangan dapat memperbaiki sistem kelistrikan PLN sehingga tidak pada ujung saluran tidak mengalami *under voltage* atau dapat dikatakan tegangan sistem berada pada nominalny. Ketika kondisi WBP PLTM Kambangan dapat mengirimkan daya pada grid PLN sebesar 3617 KVA dengan kedua pembangkit beroperasi. Ketika kondisi LWBP mengirimkan daya 1689 KVA dengan 1 pembangkit. Respon sistem eksitasi (AVR) dan *governor* berpengaruh penting terhadap kestabilan sistem sudut rotor, tegangan dan frekuensi, dari hasil simulasi didapatkan nilai CCT lebih besar dibandingkan ketika AVR dan *governor* dianggap tidak bekerja dengan mengamati sudut rotor, frekuensi dan tegangan mengalami osilasi yang lebih kecil saat AVR dan *governor* bekerja. Waktu pemutusan gangguan hubung singkat dilakukan pemutusan daya dibawah nilai waktu pemutusan kritis (CCT) sehingga generator tidak lepas sinkron dan sistem tetap stabil. Sehingga apabila PLTM Kambangan dengan kapasitas 2x1,75 MW layak apabila di sambungkan pada grid PLN

Referensi

- [1]. R. A. Subekti, “Studi Kelayakan Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro Di Desa Sukamaju Kabupaten Garut Jawa Barat,” *J. Tek. Hidraul.*, pp. 105–116, 2015.
- [2]. A. B. Laksono dan Z. Abidin, “Analisis Aliran Daya dan Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Sistem Multi Mesin dengan ETAP,” *J. Elektro*, vol. 5, no. 1, pp. 297–302, Maret 2020.
- [3]. H. Saadat, 1999, *Power System Analysis*, Mc Graw Hill, New York.
- [4]. PT PLN (Persero), Pedoman Penyambungan Pembangkit Listrik Energi Terbarukan ke Sistem Distribusi PLN, Keputusan Direksi PT PLN no 0357.K/DIR,2014.
- [5]. Sulasno, Analisis Sistem Tenaga Listrik. Semarang: Satya Wacana, 1993.
- [6]. E. Syahputra *et al.*, “Analisis Stabilitas Sistem Tenaga Listrik Menggunakan Matlab,” *Sistem Inf.*, vol. 2, no. 2, pp. 29–48, 2018.
- [7]. Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill.
- [8]. H. Slamet, “Estimasi waktu dan sudut pemutus kritis pada sistem tenaga listrik dengan metode luas sama”, vol. 9 no. 1, pp.53-60, 2010.
- [9]. PT PLN (Persero), Pedoman Penyambungan Pembangkit Energi Terbarukan ke Sistem Distribusi PT PLN (Persero), Peraturan Direksi PT PLN no 0064.P/DIR,2019.

- [10]. M. Saeedian, B. Pournazarian, S. S. Seyedalipour, B. Eskandari, and E. Pouresmaeil, "Emulating rotational inertia of synchronous machines by a new control technique in grid-interactive converters," *Sustain.*, vol. 6, no. 2, pp. 22 2020.
- [11]. Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants, IEEE Std C37.106-1987.
- [12]. B. Sudibya, "Penentuan Sudut Kritis Dan Waktu Kritis Pada Pembangkit Dengan Dua Generator," *Jurnal Litek*, Jakarta, Vol 6 no 2, pp. 43-47, September 2009.
- [13]. PT. PLN (PERSERO), "Standar-Standar Frekuensi," *Standar Perusahaan Listrik Negara*, 1995.
- [14]. Rrecommened practice for electric power quality, Standar IEEE 1159-1995.
- [15]. F. Selva dan L.Djamel, "Transient Stability Analysus of Synchronous Generator in Electrical Network," *International Journal of Scientific&Engineering Research*, vol.5, no.8, pp. 55-59 Agustus 2014.