

Analisis Stabilitas Sistem Daya Interkoneksi PLTU Waai pada Sistem Kelistrikan Ambon

Arnold J. Kastanja, Wijono, dan Hadi Suyono

Abstrak—Analisis stabilitas sistem daya pada suatu sistem tenaga listrik terhadap interkoneksinya pembangkit baru, diperlukan untuk mengetahui *performance* sistem. Adanya penambahan interkoneksi PLTU Waai akan mempengaruhi unjuk kerja sistem, ditinjau dari keadaan *steady state* ataupun stabilitas. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini adalah analisis aliran daya, *transien stability*, *rotor angle*, *frekuensi stability* dan *voltage stability* pada saat terjadi gangguan sebelum dan setelah interkoneksi. Di samping itu waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) juga dianalisis untuk mengetahui *performance* sistem. Hasil analisis *steady state* menunjukkan perbaikan profil tegangan pada Gardu Hubung (GH) rata-rata sebesar 1.163 %, sementara hasil analisis stabilitas menunjukkan bahwa waktu pemulihan sudut rotor, frekuensi dan tegangan, setelah interkoneksi lebih cepat dibandingkan dengan sebelum interkoneksi. Waktu pemutusan kritis setelah interkoneksi lebih lama 0.58 detik dari sebelum interkoneksi.

Kata kunci—PLTU, interkoneksi, Stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi, stabilitas tegangan.

I. PENDAHULUAN

PENAMBAHAN pembangkit menjadi salah satu solusi untuk mengatasi kekurangan energi listrik di pulau Ambon. Oleh karena itu untuk tahap pertama sedang dibangun di Desa Waai Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara dengan kapasitas pembangkit sebesar 2 X 15 MW, yang akan diinjeksikan ke dalam sistem jaringan 20 kV, kemudian akan dibangun lagi 2 X 10 MW di Desa Suli. Beroperasinya pembangkit baru ini akan menyebabkan terjadi perubahan aliran daya pada sistem yang sudah ada.

Analisis aliran daya diperlukan untuk mengetahui dampak yang akan ditimbulkan pada sistem, serta untuk menentukan lokasi GH dimana daya baru akan diinjeksikan untuk memperbaiki profil tegangan sesuai dengan batas-batas yang diijinkan antara +5%, -10% [1].

Banyak pemadaman yang disebabkan oleh fenomena ketidak stabilan sistem. Secara historis, ketidak stabilan transien telah menjadi dominan bagi masalah stabilitas kebanyakan sistem, sistem listrik terus berkembang

melalui pertumbuhan interkoneksi, penggunaan teknologi baru dan kontrol, berbagai bentuk ketidakstabilan sistem telah muncul. Misalnya, stabilitas tegangan, stabilitas frekuensi dan osilasi [2]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui stabilitas interkoneksi sistem daya di Ambon berdasarkan analisis aliran daya sebelum dan setelah interkoneksi, stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi dan stabilitas tegangan.

II. STABILITAS SISTEM DAYA

Untuk merencanakan ekspansi kapasitas dalam sistem listrik tidak mudah. Masing-masing Komponen (generator, permintaan dan transmisi) saling mempengaruhi satu sama lainnya, namun solusi simultan dimungkinkan supaya optimal [3]. Kegagalan yang ditimbulkan karena terbatasnya kapasitas sistem transmisi biasanya tidak mudah menentukan nilainya. Hal ini berarti kemampuan sistem transmisi untuk mendukung transaksi daya tambahan, dibatasi oleh kebutuhan untuk mempertahankan keamanan sistem. Keterbatasan kapasitas sistem transmisi karena sejumlah mekanisme yang berbeda, termasuk line transmisi, transformator, batas tegangan bus, kendala stabilitas, dan kebutuhan sistem untuk mempertahankan stabilitas tegangan [4].

III. ANALISIS STEADY STATE

Analisis aliran daya adalah suatu analisis yang dilakukan untuk menghitung tegangan, arus, daya dan faktor daya atau daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan listrik pada keadaan operasi normal. Hal penting yang dapat diperoleh dari analisis aliran daya adalah besar dan sudut fasa tegangan setiap bus, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran [5]. Jadi pada setiap bus terdapat empat parameter yaitu P, Q, V dan δ .

Pada aliran daya, bus dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu bus referensi (slack bus), bus generator dan bus beban. Persamaan unjuk kerja sistem tenaga listrik dapat dinyatakan dalam bentuk admitansi sebagai berikut:

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \dots\dots\dots(1)$$

dimana I_{bus} : arus bus yang diinjeksikan (A)

Y_{bus} : matrik admitansi bus (U)

V_{bus} : tegangan bus (V)

atau dapat ditulis dengan persamaan berikut

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot V_q \quad p:1, 2, 3 \dots n \dots\dots\dots (2)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah

Arnold J. Kastanja, mahasiswa Program Magister Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (e-mail: aj_kastanja@yahoo.co.id).

Wijono, dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Telp.0341-554166; wijono@yahoo.com).

Hadi Suyono, dosen Teknik Elektro, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (Telp.0341-554166; e-mail: hadis@ub.ac.id).

$$P_p - jQ_p = V_p I_p \dots\dots\dots(3)$$

atau

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p} \dots\dots\dots (4)$$

dimana

- I_p : arus pada bus p
- V_p : tegangan pada bus p
- P_p : daya aktif pada bus p
- Q_p : daya reaktif pada bus p

Persamaan aliran daya diselesaikan menggunakan proses pengulangan (metode iterasi), dengan menetapkan nilai-nilai perkiraan untuk tegangan bus yang tidak diketahui, dan menghitung nilai baru untuk setiap tegangan pada bus, dari nilai perkiraan bus yang lain. Untuk menyelesaikan analisis aliran daya digunakan metode, pada penelitian ini metode yang digunakan yaitu *Newton-Raphson*. Metode ini menerapkan deret *taylor* untuk mendapatkan turunan persamaan matematika sebagai dasar perhitungan iterasi yang melibatkan penggunaan matrik *Jacobian*.

Dengan mensubsitusikan persamaan (2) ke dalam persamaan (3) diperoleh persamaan:

$$P_p - jQ_p = |V_p| \angle -\delta_p \left(\sum_{q=1}^n |Y_{pq}| |V_q| \angle \theta_{pq} + \delta_q \right) \quad (5)$$

atau

$$P_p - jQ_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |Y_{pq}| |V_q| \angle (\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) \dots \quad (6)$$

Pemisahan bagian nyata dan imajiner, akan diperoleh persamaan daya nyata pada bus p adalah

$$P_p = \sum_{q=1}^n |V_p| |V_q| |Y_{pq}| \cos(\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) \dots\dots\dots (7)$$

Persamaan daya reaktif pada bus p adalah

$$Q_p = -\sum_{q=1}^n |V_p| |V_q| |Y_{pq}| \sin(\theta_{pq} + \delta_q - \delta_p) \dots\dots\dots (8)$$

Persamaan sudut fasa tegangan dan tegangan yang baru seperti pada persamaan berikut:

$$\delta^{(k+1)} = \delta^{(k)} + \Delta\delta^{(k)} \dots\dots\dots (9)$$

$$|V|^{(k+1)} = |V|^{(k)} + \frac{\Delta V}{V} |V|^{(k)} \dots\dots\dots (10)$$

dimana:

- $\delta^{(k+1)}$: sudut fasa tegangan baru
- $\delta^{(k)}$: sudut fasa tegangan lama
- $\Delta\delta^{(k)}$: nilai koreksi sudut fasa tegangan
- $|V|^{(k+1)}$: tegangan yang baru
- $|V|^{(k)}$: tegangan yang lama
- $\frac{\Delta V}{V} |V|^{(k)}$: nilai koreksi tegangan

Arus yang mengalir pada bus p ke q adalah:

$$I_{pq} = (V_p - V_q) Y_{pq} + V_p \frac{Y'_{pq}}{2} \dots\dots\dots (11)$$

dimana

- Y_{pq} : admitansi saluran dari p ke q
- Y'_{pq} : admitansi *line charging* total.

$V_p \frac{Y'_{pq}}{2}$: arus yang mengalir pada bus akibat adanya

line charging ke tanah

I_{pq} : arus yang mengalir pada bus p ke q

V_p : tegangan pada bus p

V_q : tegangan pada bus q

IV. ANALISIS DINAMIS SISTEM DAYA

A. Stabilitas Sudut Rotor

Dalam sebuah mesin sinkron, penggerak utama memberikan sebuah torsi mekanis T_m pada poros mesin dan mesin menghasilkan suatu torsi elektromagnetik T_e . Jika sebagai akibat dari gangguan, torsi mekanik lebih besar dari torsi elektromagnetik, sebuah torsi percepatan T_a adalah

$$T_a = T_m - T_e \dots\dots\dots(12)$$

dimana

- T_a : torsi percepatan
- T_m : torsi mekanis
- T_e : torsi elektromagnetik

Pada sistem yang stabil selama gangguan, sudut rotor akan berosilasi disekitar titik keseimbangan. Ketika terjadi gangguan atau penambahan beban secara tiba-tiba dalam jumlah besar, maka daya keluar elektrik generator akan jauh melampaui daya masuk mekanis. Kekurangan ini akan disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Jadi generator akan berputar lebih lambat sehingga sudut daya generator bertambah besar dan daya masuk generator juga bertambah. Jika sudut rotor meningkat tanpa batas, mesin dikatakan tidak stabil selama mesin terus mempercepat dan tidak mencapai keadaan keseimbangan baru. Dalam multi mesin, mesin akan melepas sinkronisasi dengan mesin lainnya.

B. Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi berkaitan dengan kemampuan sistem daya untuk mempertahankan kestabilan frekuensi dalam kisaran nominal setelah sistem mengalami gangguan berat, yang mengakibatkan ketidak seimbangan signifikan antara pembangkit dan beban. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem pembangkitan dan beban, dengan meminimalkan kerugian beban. Gangguan sistem yang parah umumnya mengakibatkan pengaruh besar pada frekuensi, arus, tegangan dan variable sistem lainnya [6]. Umumnya masalah stabilitas frekuensi berkaitan dengan ketidak mampuan tangapan peralatan proteksi, atau cadangan pembangkit tidak mencukupi. Meskipun stabilitas dipengaruhi oleh dinamika yang lambat, kerangka waktu keseluruhan meluas hingga beberapa menit. Mode elektromekanis yang melibatkan waktu ini biasanya terjadi pada kisaran frekuensi 0.1-2 Hz. Mode antar wilayah dikaitkan dengan kelompok mesin yang berayun terhadap kelompok yang lain melalui saluran transmisi. Mode elektromekanis frekuensi yang lebih tinggi 1-2 Hz yang melibatkan satu atau dua generator

yang berayun terhadap terhadap seluruh sistem daya atau berayun satu sama lain.

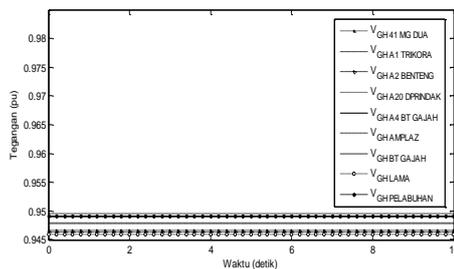
C. Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan mengacu pada suatu pernyataan "kemampuan suatu sistem tenaga untuk menjaga tegangan tetap stabil di semua bus dalam suatu sistem setelah mengalami gangguan terhadap kondisi operasi awal" [7]. Jika stabilitas tegangan terjaga, tegangan dan daya pada sistem akan dapat dikendalikan setiap saat. Secara umum, ketidakmampuan sistem untuk memasok kebutuhan yang diperlukan menyebabkan ketidakstabilan tegangan. Suatu sistem memasuki daerah ketidak stabilan tegangan ketika suatu gangguan menyebabkan kondisi sistem mengalami *drop* tegangan yang tidak dapat dikendalikan.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi Aliran Daya Sebelum Interkoneksi

Hasil analisis aliran daya sebelum interkoneksi PLTU Waai pada beban maksimum, ditunjukkan pada Gambar.1, diperoleh GH yang mengalami *drop* tegangan melebihi 5%, yaitu terjadi pada GH 41 MG Dua, GH A1 Trikora, GH A2 Benteng, GH A20 Dprindak, GH A4 BT Gajah, GH Amplaz, GH BT Gajah, GH Lama dan GH Pelabuhan.



Gambar. 1. Drop Tegangan Sebelum Interkoneksi PLTU Waai

Drop tegangan paling besar terjadi pada GH Lama sebesar 5,41%, diperoleh dari selisih antara tegangan pada ujung pengirim bus G1 dengan tegangan pada ujung penerima GH Lama. GH yang *drop* tegangannya melebihi 5%, akan dijadikan sebagai acuan untuk menentukan titik injeksi terbaik terhadap masuknya daya pembangkit baru. Titik injeksi terbaik selain ditentukan berdasarkan *Drop* tegangan paling besar, letak geografis dari GH juga dijadikan sebagai bahan pertimbangan.

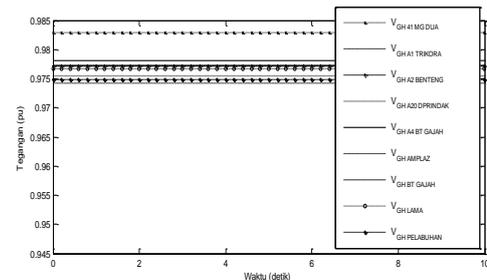
GH Lama dan GH Benteng merupakan GH yang paling besar *drop* tegangannya yaitu sebesar 5.41% dan 5.36% tetapi kedua GH ini berada sangat jauh posisinya dari pembangkit baru sehingga menambah panjang saluran.

GH 41 MG Dua dengan *drop* tegangan sebesar 5.33%, GH ini dipilih karena letak geografisnya berada dipinggiran pusat kota dan secara langsung terhubung ke semua GH yang profil tegangannya mengalami *drop* melebihi 5%. GH Passo Walaupun profil tegangannya dengan *drop* 3,53%, GH ini juga diinjeksikan daya PLTU

Waai sebab merupakan GH antara PLTD Hative Kecil Dengan PLTD Poka dan juga karena kondisi geografis pulau Ambon jaringan tentu akan melewati GH Passo.

B. Simulasi Aliran Daya Setelah Interkoneksi

Setelah menentukan daya PLTU Waai diinjeksikan ke GH Passo dan GH 41 MG Dua, dari hasil simulasi aliran daya setelah interkoneksi yang ditunjukkan pada Gambar.2, terjadi perbaikan pada profil tegangan yang sebelumnya berada dibawah 0.95 pu, kini berada diatas 0,97 pu, dengan kenaikan rata-rata pada semua GH sebesar 1.163%.



Gambar. 2. Profil Tegangan Setelah Interkoneksi PLTU Waai

Untuk hasil simulasi aliran daya pada saluran, sebelum interkoneksi untuk beban maksimum, ditunjukkan bahwa aliran daya yang terbesar ada pada saluran dari GH Rijali ke GH 43 TNH Tinggi sebesar 63.21%, setelah interkoneksi turun menjadi 41.9 % dari rating saluran.

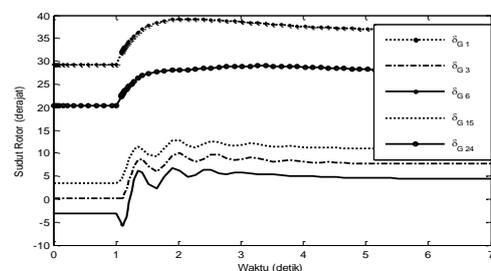
Sedangkan untuk perbandingan total *losses* ditunjukkan pada Tabel I untuk beban maksimum, diperoleh *losses* daya aktif sebelum interkoneksi sebesar 5.00 %, setelah interkoneksi sebesar 3.36 % dan daya reaktif sebelum interkoneksi 37.97 %, setelah interkoneksi 28.68 %.

TABLE I
TOTAL LOSSES SEBELUM DAN SETELAH INTERKONEKSI PADA BEBAN MAKSIMUM

	SEBELUM	SETELAH
Total Losses		
Daya Aktif (MW)	5.00 %	3.36 %
Daya Reaktif (MVAR)	37.97 %	28.68 %

C. Stabilitas Sudut Rotor Sebelum Interkoneksi

Hasil stabilitas sudut rotor sistem Ambon sebelum interkoneksi PLTU Waai ditunjukkan pada Gambar.3.



Gambar. 3. Grafik Sudut Rotor $f(t)$ pada Generator 1, 3, 6, 15 dan 24

Hasil stabilitas sudut rotor yang ditampilkan pada generator 1, 3, 6, 15 dan 24, hanya sebagian generator yang ditampilkan karena sistem Ambon menggunakan pembangkit daya PLTD dengan banyak unit pembangkit

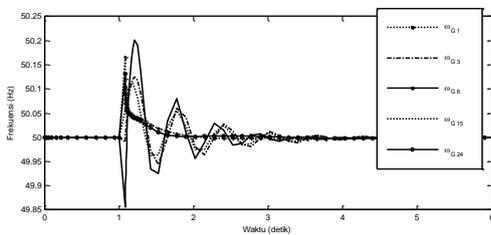
yang kapasitasnya kecil sehingga dipilih 5 generator yang sudut rotornya berbeda. Dari gambar.3 hasil simulasi grafik sudut rotor fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel II yang mana saat sistem mengalami gangguan pada detik 1, sudut rotor mengalami perubahan dan dapat kembali stabil dengan sudut yang baru, dengan waktu pemulihan untuk G1 selama 8,917, G3 selama 11,917, G6 selama 8,517, G15 dan G24 selama 9,917 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

TABLE II
STABILITAS SUDUT ROTOR

Generator	Ayunan	δ Awal (derajat)	δ selama Gangguan (derajat)	δ Baru (derajat)	t Steady State (detik)
G 1	Maks	29,8	39,85	37,5	8,917
	Min	-	-	-	
G 3	Maks	0,75	10,5	8,45	11,917
	Min	-	-	-	
G 6	Maks	-2,6	7,5	5,15	8,517
	Min	-	-5,25	-	
G 15	Maks	3,9	13,5	11,64	9,917
	Min	-	-	-	
G 24	Maks	20,76	29,7	28,45	9,917
	Min	-	-	-	

D. Stabilitas Frekuensi Sebelum Interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas frekuensi sebelum interkoneksi PLTU Waai ditunjukkan pada Gambar.4. Sebelum terjadi gangguan frekuensi generator 1, 3, 6, 15 dan 24 berada pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz, hingga terjadi gangguan pada detik 1.



Gambar. 4. Grafik Frekuensi f(t) pada Generator 1, 3, 6, 15 dan 24

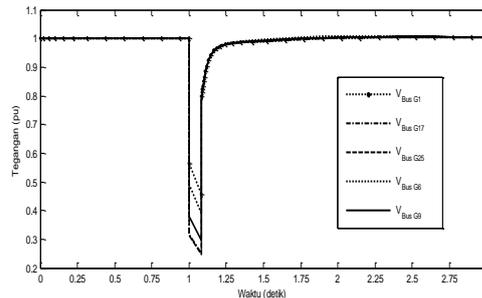
TABLE III
STABILITAS FREKUENSI

Generator	Ayunan	f Selama Gangguan (Hz)	f Steady State (Hz)	t Steady State (detik)
G 1	Maks	50,167	50	4,117
	Min	-		
G 3	Maks	50,12	50	4,917
	Min	49,945		
G 6	Maks	50,2	50	3,917
	Min	49,86		
G 15	Maks	50,114	50	4,917
	Min	49,961		
G 24	Maks	50,132	50	5,917
	Min	-		

Dari Gambar.4 hasil simulasi grafik frekuensi fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel III yang mana saat sistem mengalami gangguan, frekuensi mengalami osilasi dan dapat kembali stabil pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz, dengan waktu pemulihan untuk G 1 selama 4,117, G 6 selama 3,917, G 24 selama 5,917, G 3 dan G 15 selama 4,917 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

E. Stabilitas Tegangan Sebelum Interkoneksi

Stabilitas tegangan sebelum interkoneksi PLTU Waai ditunjukkan pada Gambar.5 untuk kelima bus generator, kelima bus generator ini sebelum terjadi gangguan semuanya bekerja pada tegangan 1 pu, hingga terjadi gangguan pada detik 1.



Gambar. 5. Grafik Tegangan f(t) pada Bus Generator 1, 6, 9, 17 dan 25

Dari Gambar.5 hasil simulasi grafik tegangan fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel IV yang mana saat sistem mengalami gangguan pada detik 1, tegangan mengalami drop dan dapat kembali stabil pada tegangan kerja yaitu 1 pu, dengan waktu pemulihan untuk bus G 1 selama 4,517, G 6 selama 3,917, G 9 selama 2,617, G 17 selama 2,917 dan G 25 selama 2,417 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

TABLE IV
STABILITAS TEGANGAN

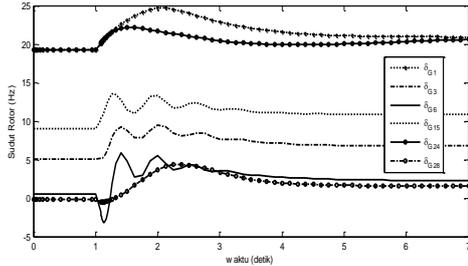
Bus	V drop (pu)	V Steady State (pu)	t Steady State (detik)
Generator			
G 1	0,46	1	4,517
G 6	0,39	1	3,917
G 9	0,3	1	2,617
G 17	0,26	1	2,917
G 25	0,25	1	2,417

F. Stabilitas Sudut Rotor Setelah Interkoneksi

Stabilitas sudut rotor setelah interkoneksi PLTU Waai, yang dibahas adalah stabilitas sudut rotor pada generator 1, 3, 6, 15, 24 dan 28.

Dari Gambar.6 hasil simulasi grafik sudut rotor fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel V yang mana saat sistem mengalami gangguan pada detik 1, sudut rotor mengalami perubahan dan dapat kembali stabil dengan sudut yang baru, dengan waktu pemulihan untuk G 1, G 24 selama 7,917, G 3 selama 8,917, G 6, G 15 selama 6,917 dan G 28 selama 7,617 detik setelah gangguan

dihilangkan dari sistem.



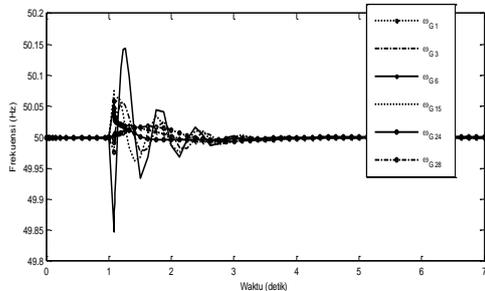
Gambar. 6. Grafik Sudut Rotor $f(t)$ pada Generator 1, 3, 6, 15, 24 dan 28

TABLE V
STABILITAS SUDUT ROTOR

Generator	Ayunan	δ awal (derajat)	δ Selama Gangguan (derajat)	δ Baru (derajat)	t Steady State (detik)
G 1	Maks		24,5		
	Min	19,2	-	20,8	7,917
G 3	Maks		9,3		
	Min	5,1	-	6,66	8,917
G 6	Maks		5,8		
	Min	0,47	-3,2	2,1	6,917
G 15	Maks		13,3		
	Min	9,02	-	10,65	6,917
G 24	Maks		22,1		
	Min	19,21	-	20,81	7,917
G 28	Maks		4,23		
	Min	-0,17	-	1,43	7,617

G. Stabilitas Frekuensi Setelah Interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas frekuensi setelah interkoneksi PLTU Waai ditunjukkan pada Gambar.7 untuk generator 1, 3, 6, 15, 24 dan 28.



Gambar. 7. Grafik Frekuensi $f(t)$ pada Generator 1, 3, 6, 15, 24 dan 28

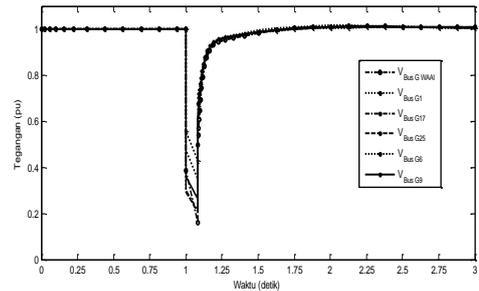
TABLE VI
STABILITAS FREKUENSI

Generator	Ayunan	f Selama Gangguan (Hz)	f Steady State (Hz)	t Steady State (detik)
G 1	Maks	50,058		
	Min	-	50	4,017
G 3	Maks	50,056		
	Min	49,977	50	4,217
G 6	Maks	50,146		
	Min	49,85	50	3,417
G 15	Maks	50,07		
	Min	49,963	50	4,417
G 24	Maks	50,058		
	Min	-	50	4,917
G 28	Maks	50,017		
	Min	49,975	50	4,917

Dari Gambar.7 hasil simulasi grafik frekuensi fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel VI yang mana saat sistem mengalami gangguan pada detik 1, frekuensi mengalami osilasi dan dapat kembali stabil pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz, dengan waktu pemulihan untuk G1 selama 4,017, G3 selama 4217, G6 selama 3,417, G15 selama 4,417, G24 dan G28 selama 4,917 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

H. Stabilitas Tegangan Setelah Interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas tegangan setelah interkoneksi PLTU Waai ditunjukkan pada Gambar.8 untuk bus G 1, 6, 9, 17, 25 dan Waai.



Gambar. 8. Grafik Tegangan $f(t)$ pada Bus Generator 1, 6, 17, 25 dan Waai

TABLE VII
STABILITAS TEGANGAN

Bus	V Drop (pu)	V Steady State (pu)	t Steady State (pu)
Generator			
G 1	0,432	1	4,117
G 6	0,35	1	2,217
G 9	0,27	1	2,417
G 17	0,22	1	2,417
G 25	0,21	1	1,917
G Waai	0,19	1	2,217

Dari Gambar.8 hasil simulasi grafik tegangan fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel VII yang mana saat sistem mengalami gangguan pada detik 1, tegangan mengalami drop dan dapat kembali stabil pada tegangan kerja yaitu 1 pu, dengan waktu pemulihan untuk bus G 1 selama 4,117, G 6, G Waai selama 2,217, G 9, G 17 selama 2,417 dan G 25 selama 1,917 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

I. Perbandingan Stabilitas Sudut Rotor, Frekuensi dan Tegangan.

TABLE VIII
PERBANDINGAN STABILITAS SUDUT ROTOR

Generator	Sebelum		Setelah	
	δ (derajat)	t Steady State (detik)	δ (derajat)	t Steady State (detik)
G 1	37,5	8.917	20,8	7.917
G 3	8,45	11.917	6,66	8.917
G 6	5,15	8.517	2,1	6.917
G 15	11,64	9.917	10,65	6.917

Berdasarkan hasil analisis stabilitas sistem daya pada sistem kelistrikan Ambon sebelum dan setelah

interkoneksi PLTU Waai, maka dapat diperoleh gambaran umum tentang stabilitas sistem daya di Ambon, seperti ditunjukkan pada Tabel VIII perbandingan stabilitas sudut rotor, Tabel IX perbandingan stabilitas frekuensi dan Tabel X perbandingan stabilitas tegangan.

TABLE IX
PERBANDINGAN STABILITAS FREKUENSI

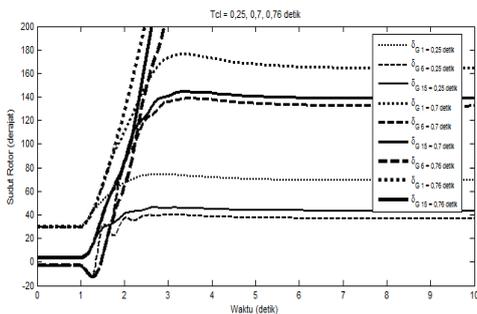
Generator	Sebelum		Setelah	
	f (Hz)	t Steady State (detik)	f (Hz)	t Steady State (detik)
G 1	50	4.117	50	4.017
G 3	50	4.917	50	4.217
G 6	50	3.917	50	3.417
G15	50	4.917	50	4.417

TABLE X
PERBANDINGAN STABILITAS TEGANGAN

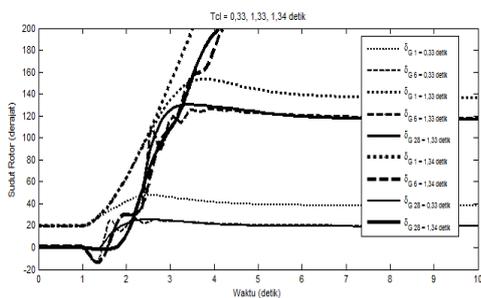
Bus	Sebelum		Setelah	
	V (pu)	t Steady State (detik)	V (pu)	t Steady State (detik)
G 1	1	4.517	1	4.117
G 6	1	3.917	1	2.217
G 9	1	2.617	1	2.417
G 17	1	2.917	1	2.417
G 25	1	2.417	1	1.917

J. Waktu Pemutus Kritis

Untuk mengetahui waktu pemutus kritis pada sistem kelistrikan Ambon sebelum dan setelah interkoneksi PLTU Waai, dapat dilakukan dengan *trial and error* dengan mengubah-ubah nilai waktu gangguan.



Gambar. 9. Grafik Sudut Rotor f(t) pada Generator 1, 6 dan 15



Gambar. 10. Grafik Sudut Rotor f(t) pada Generator 1, 6 dan 28

Untuk sebelum interkoneksi dilakukan simulasi stabilitas dengan durasi 0.25, 0.7; dan waktu gangguan

ketika sudut rotor mengalami lepas sinkron selama 0.76 detik ditunjukkan Pada Gambar.9.

Setelah interkoneksi dilakukan simulasi dengan durasi 0.33, 1.33; dan ketika sudut rotor mengalami lepas sinkron pada gangguan yang berlangsung selama 1.34 detik ditunjukkan pada Gambar.10. Setelah interkoneksi waktu lepas sinkron lebih lama 0,58 detik dari sebelum interkoneksi.

VI. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan sistem kelistrikan Ambon terhadap interkoneksi PLTU Waai 2x15 MW, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Dengan interkoneksi PLTU Waai, selain mengisih kekurangan daya pada sistem, sekaligus langsung memperbaiki profil tegangan pada GH, yang rata-rata kenaikan untuk beban maksimum sebesar 1.163%.
2. Dengan masuknya daya PLTU Waai berpengaruh langsung kepada aliran daya di saluran. Saluran dengan aliran daya terbesar terdapat pada GH Rijali ke GH 43 TNH Tinggi yang sebelumnya 63.21%, setelah diijeksikan daya PLTU Waai turun menjadi 41.9%.
3. Dari hasil analisis sebelum dan setelah interkoneksi PLTU Waai, *losses* pada beban maksimum sebelum interkoneksi, daya aktif sebesar 5.00%, daya reaktif sebesar 37.97%, setelah interkoneksi rugi daya aktif turun menjadi 3.36 % dan daya reaktif 28.68%.
4. Pada saat terjadi gangguan dengan durasi waktu singkat, sistem daya di Ambon berada dalam kondisi stabil, dimana setelah mengalami gangguan, sudut rotor, frekuensi dan tegangan dapat kembali pada operasi normalnya.
5. Setelah Interkoneksi PLTU Waai, waktu pemutus kritis generator lebih lama 0.58 detik, dibandingkan dengan sebelum interkoneksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Permen ESDM, 04. 2009. Aturan Distribusi Tenaga Listrik.
- [2] Kundur. 2004, Definition and Classification of Power System Stability, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, NO. 2
- [3] Schuler R.E, 2011, Efficient Pricing and Capital Recovery for Infrastructure over Time, IEEE Incentives and Applications for Electric Transmission Expansion, Hawaii International Conference, Ithaca, NY 14853, 8
- [4] Overbye, T.J., J.D. Weber and K.J. Patten, 1999. Analysis and Visualization of Market Power in Electric Power Systems, IEEE, Hawaii International Conference on System Sciences, Urbana. IL 61801, 3.
- [5] Saadat Hadi. 1999. *Power System Analisis*. Milwake School of Engineering, New York.
- [6] Grigsby, Leonard L. 2007. *Power System Stability and Control*. New York: Taylor and Francis Group, LLC
- [7] Kadir, A. 2006. *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*. Universitas Indonesia. Jakarta.