

Perencanaan Sistem Interkoneksi Jaringan Listrik Kabel Bawah Laut di Propinsi Maluku

Johanis Tupalessy, Rini Nur Hasanah, dan Hadi Suyono

Abstract—Power system stability analysis is required to determine the performance of a power system. In this paper an analysis is performed on the interconnection system of Ambon, Haruku, and Saparua islands in Maluku region of Indonesia. The analyses in this research include load-flow analysis, steady-state and transient stability analysis, rotor angle, frequency and voltage stability during fault conditions, both before and after the interconnection. Critical clearing time has been analyzed to determine the system performance after a fault interruption. Results of steady-state stability analysis show a voltage profile improvement of 1.163%. The results also show that after interconnection better condition of rotor angle, frequency and voltage, and faster recovery time are obtained. Critical clearing time after interconnection is 0.58 seconds longer than before the interconnection.

Index Terms—Interconnection, voltage profile, load flow, system stability.

Abstrak—Analisis stabilitas sistem daya diperlukan untuk mengetahui unjuk kerja suatu sistem tenaga listrik. Dalam paper ini analisis dilakukan pada interkoneksi sistem Ambon, Haruku, dan Saparua. Analisis yang pada penelitian ini mencakup analisis aliran daya, analisis stabilitas ditinjau dari keadaan steady-state maupun transient, sudut rotor, stabilitas frekwensi dan tegangan pada saat terjadi gangguan, baik sebelum dan setelah interkoneksi. Waktu pemutusan kritis dianalisis untuk mengetahui unjuk kerja sistem setelah terjadi gangguan. Hasil analisis kondisi steady-state menunjukkan perbaikan profil tegangan rata-rata pada Gardu Hubung (GH) sebesar 1,163%. Hasil analisis stabilitas menunjukkan bahwa waktu pemulihan sudut rotor, frekuensi dan tegangan lebih baik setelah interkoneksi dibandingkan dengan sebelum interkoneksi. Waktu pemutusan kritis setelah interkoneksi lebih lama 0,58 detik dari sebelum interkoneksi.

Kata Kunci—Interkoneksi, profil tegangan, aliran daya, stabilitas sistem.

I. PENDAHULUAN

SISTEM interkoneksi tenaga listrik merupakan suatu sistem yang terdiri dari beberapa pusat pembangkit listrik dan beberapa gardu induk (GI) yang saling terhubung antara satu dengan yang lain melalui sebuah saluran transmisi dan melayani semua beban yang ada pada gardu induk yang terhubung ke sistem distribusi[1]. Propinsi Maluku terdiri dari beberapa pulau yang sistem kelistrikannya belum terhubung secara interkoneksi. Untuk meningkatkan unjuk kerja sistem kelistrikan tersebut, maka diperlukan suatu analisis perencanaan sistem interkoneksinya. Perencanaan tersebut akan membawa dampak terhadap stabilitas sistem daya yang telah ada, baik dari segi

stabilitas tegangan, stabilitas frekuensi dan stabilitas sudut rotor[2]. Oleh karena itu, pada penelitian ini dianalisis stabilitas sistem daya pada sistem interkoneksi jaringan listrik kabel bawah laut pada tiga pulau yaitu Pulau Ambon, Haruku, dan Saparua. Sistem kabel bawah laut menjadi penting karena tidak tersedia jembatan penghubung antar pulau disamping jika kabel dilewatkan melalui pelampung-pelampung akan mengganggu lalu lintas perairan antar pulau.

Dalam merencanakan ekspansi sistem interkoneksi dibutuhkan komponen generator, transformator, pembebanan dan saluran transmisi yang saling mempengaruhi satu sama lainnya[3]. Penggunaan kabel bawah laut untuk interkoneksi sistem tenaga listrik mulai diimplementasikan di beberapa daerah, salah satunya sistem interkoneksi kelistrikan Pulau Jawa, Madura, dan Bali[4]. Interkoneksi kelistrikan Pulau Jawa, Madura, dan Bali melalui saluran transmisi kabel bawah laut 150 kV dengan menggunakan jenis kabel HVDC. Pada sistem interkoneksi di Pulau Ambon pada paper ini digunakan jenis kabel HVAC. Analisis aliran daya sebelum dan setelah interkoneksi dilakukan menggunakan metode *Newton Raphson*. Analisis terhadap stabilitas sistem daya dilakukan untuk melihat respon dinamik sistem terhadap adanya gangguan. Skenario interkoneksi dilakukan dengan menggunakan tegangan 20 kV dan 70 kV agar rugi-rugi daya, *drop* tegangan dan kestabilan sistem daya pada kedua kondisi dapat dibandingkan. Skenario terbaik menjadi rujukan untuk penerapan perencanaan sistem interkoneksi bawah laut Pulau Ambon.

II. ANALISIS STEADY STATE

Analisis aliran daya digunakan untuk menghitung tegangan, arus, daya dan faktor daya yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan listrik pada keadaan operasi normal. Dari analisis tersebut dapat diperoleh besar dan sudut fasa tegangan setiap bus, daya aktif dan daya reaktif yang mengalir dalam setiap saluran [5], dalam bentuk parameter P, Q, V dan δ .

Pada aliran daya, bus dikelompokkan menjadi tiga jenis yaitu bus referensi (*slack bus*), bus generator dan bus beban. Arus dan tegangan pada bus dihubungkan oleh besaran admitansi, seperti yang dinyatakan dalam persamaan (1).

$$I_{bus} = Y_{bus} \quad (1)$$

dengan

I_{bus} = arus bus yang diinjeksikan (A)

Y_{bus} = matrik admitansi bus (\bar{U})

V_{bus} = tegangan bus (V)

atau dapat ditulis juga dengan persamaan (2)

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

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah

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

atau

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

dengan

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 *Newton-Raphson*. Metode ini menerapkan deret *taylor* untuk mendapatkan turunan persamaan matematika sebagai dasar perhitungan iterasi yang melibatkan penggunaan matrik *Jacobian*.

Dengan mensubstitusikan 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

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

Pemisahan bagian nyata dan imajiner akan memberikan persamaan daya nyata pada bus p sebagai berikut

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

Persamaan daya reaktif pada bus p adalah

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

Persamaan sudut fasa tegangan dan tegangan yang baru dinyatakan dengan persamaan berikut:

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

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

Arus yang mengalir dari bus p ke q adalah:

$$I_{pq} = (V_p - V_q) Y_{pq} + V_p \frac{Y_{pq}}{2} \quad (11)$$

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

III. ANALISIS DINAMIS SISTEM DAYA

A. Stabilitas Sudut Rotor

Dalam sebuah mesin sinkron, penggerak utama memberikan torsi mekanis T_m pada poros mesin dan

mesin menghasilkan torsi elektromagnetik T_e . Jika sebagai akibat dari suatu gangguan, torsi mekanis menjadi lebih besar dari torsi elektromagnetik, akan timbul torsi percepatan T_a yaitu:

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

Pada sistem yang stabil jika terjadi gangguan sudut rotor akan berosilasi di sekitar titik keseimbangan. Ketika terjadi gangguan atau penambahan beban secara tiba-tiba dalam jumlah besar, maka daya keluar listrik generator akan jauh melampaui daya masuk mekanis. Kekurangan ini akan disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator, sehingga generator akan berputar lebih lambat yang selanjutnya akan menyebabkan 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 system 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 ketidakseimbangan 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 fatal umumnya mengakibatkan pengaruh besar pada frekuensi, arus, tegangan dan variabel sistem lainnya[6]. Umumnya masalah stabilitas frekuensi berkaitan dengan ketidakmampuan tanggapan peralatan proteksi, atau cadangan pembangkit yang tidak mencukupi. Meskipun stabilitas dipengaruhi oleh dinamika yang lambat, kerangka waktu keseluruhan meluas hingga beberapa menit.

C. Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan didefinisikan sebagai 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 ketidakstabilan tegangan ketika suatu gangguan menyebabkan kondisi sistem mengalami penurunan tegangan yang tidak dapat dikendalikan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

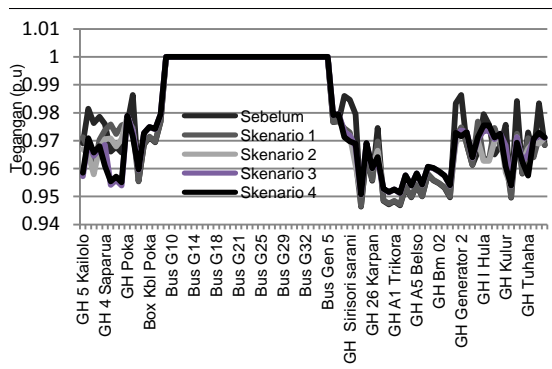
Pada penelitian ini simulasi dilakukan menggunakan 4 skenario. Pada skenario 1, Gardu Induk (GI) dan Gardu Hubung Interkoneksi (GHI) Tulehu dihubungkan menggunakan kabel bawah laut 20kV ke GHI dan GI

Haruku dan selanjutnya ke bus beban menuju GI dan GHI Hulaliu, yang selanjutnya menuju ke GHI dan GI Kulur. Pada skenario 2, GI dan GHI Tulehu dihubungkan menggunakan kabel bawah laut 70kV ke GHI dan GI Haruku dan selanjutnya ke bus PLTD Haruku, selanjutnya menuju GI dan GHI Hulaliu, yang selanjutnya melalui kabel bawah laut 70kV menuju ke GHI dan GI Kulur. Skenario 3 berbeda dari skenario 2 pada level tegangan kabel bawah laut yang digunakan, yaitu 20kV, dan setelah ke GHI dan GI Haruku bukan dihubungkan ke bus beban, melainkan ke bus PLTD Haruku sebelum ke GI dan GHI Hulaliu. Skenario 4 berbeda dari skenario 1 pada level tegangan kabel bawah laut yang digunakan, yaitu 70kV, dan setelah ke GHI dan GI Haruku bukan dihubungkan ke bus PLTD Haruku, melainkan ke bus beban, sebelum ke GI dan GHI Hulaliu.

A. Aliran Daya Sebelum dan Setelah Interkoneksi

Skenario 3 menghasilkan nilai rugi-rugi daya aktif sebesar 1,14 MW (2,91%) dan daya reaktif sebesar 7,04MVAR(23%), yang merupakan nilai terkecil dibandingkan ketiga skenario lainnya, yang juga menghasilkan penurunan tegangan terbesar menjadi 0.951 p.u (4,93%).

Hasil analisis aliran daya sebelum dan setelah interkoneksi pada kondisi beban maksimum, ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar. 1. Profil tegangan sebelum dan setelah interkoneksi (skenario 1, 2, 3, dan 4)

Pada gambar 1 terlihat bahwa penurunan tegangan tertinggi sistem sebelum interkoneksi mencapai 5,4% (menjadi 0.946 p.u.) yang terjadi di GH12 Lama, GHA41 Mangga Dua, dan GHA2 Benteng. GH yang penurunannya melebihi 5% akan dijadikan sebagai acuan untuk melakukan skenario interkoneksi antar pembangkit. Skenario 1 setelah interkoneksi menunjukkan penurunan tegangan tertinggi mencapai 5,34% (menjadi 0.947 p.u.). Skenario-2 menunjukkan penurunan tegangan tertinggi sebesar 4,94,% (menjadi 0.95 p.u.). Skenario-3 menunjukkan penurunan tegangan tertinggi menjadi 0.951 p.u (penurunan 4,93%). Skenario-4 penurunan tegangan tertinggi menjadi 0.96 p.u (penurunan 4,94%). Hasil simulasi aliran daya sebelum dan setelah interkoneksi menunjukkan terjadinya perbaikan pada profil tegangan yang sebelumnya berada dibawah 0.95 p.u. naik diatas 0,95 p.u., dengan kenaikan rata-rata pada semua GH sebesar 1.163%. Kondisi tegangan pada masing-masing

skenario menunjukkan kondisi tegangan terbaik terdapat pada sistem interkoneksi skenario-3. Pada tabel I ditunjukkan perbandingan total rugi-rugi daya aktif-reaktif sebelum dan setelah interkoneksi sistem.

TABEL I
TOTAL RUGI-RUGI DAYA SEBELUM DAN SETELAH INTERKONEKSI

Daya Aktif dan Reaktif	Sebelum Interkoneksi		Setelah Interkoneksi		
	20 kV	Skenario1 (20 kV)	Skenario2 (70 kV)	Skenario3 (20 kV)	Skenario4 (70 kV)
P gen (MW)	39.9471	40.3925	39.5724	39.3907	39.401
Q gen (MVAR)	33.3057	34.8463	31.004	30.7469	30.7806
P load (MW)	38.2447	38.2447	38.2447	38.2447	38.2447
Q load (MVAR)	23.7021	23.7021	23.7021	23.7021	23.7021
P loss (MW)	1.7024	2.1435	1.2952	1.1135	1.1238
Q loss (MVAR)	9.6036	11.1415	7.2818	7.0246	7.0583

Hasil simulasi aliran daya sebelum interkoneksi menunjukkan rugi-rugi daya aktif sebesar 1.70 MW (4,26%) dan daya reaktif sebesar 9.6 Mvar (29%). Pada sistem setelah interkoneksi skenario-1 menghasilkan rugi-rugi daya aktif sebesar 2,14 MW (5,32%) dan daya reaktif sebesar 11,1 Mvar (32%). Pada skenario-2 menghasilkan rugi-rugi daya aktif sebesar 1,32 MW (3,36%) dan daya reaktif sebesar 7,30 MVar (24%). Pada skenario-3 menghasilkan nilai rugi-rugi daya aktif sebesar 1,14 MW (2,91%) dan daya reaktif sebesar 7,04 Mvar (23%). Selanjutnya pada skenario-4 menghasilkan nilai rugi-rugi daya aktif sebesar 1,153 MW (2,93%) dan daya reaktif sebesar 7,07 Mvar (23,1%). Hasil analisis aliran daya sebelum dan setelah interkoneksi pada masing-masing skenario menunjukkan kondisi ideal terdapat pada sistem interkoneksi skenario-3. Karena menghasilkan nilai rugi-rugi daya aktif sebesar 1,14 MW (2,91%) dan daya reaktif sebesar 7,04 Mvar (23%).

B. Stabilitas Sudut Rotor Sebelum Interkoneksi

Hasil stabilitas sudut rotor sistem Ambon sebelum interkoneksi sistem ditunjukkan pada gambar 2.

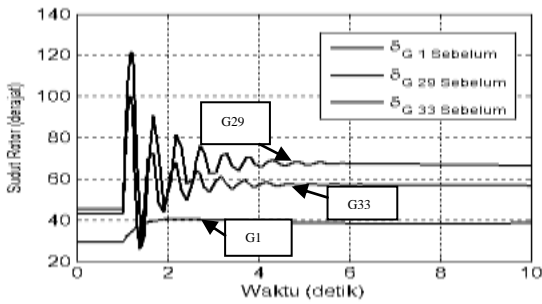
Hasil stabilitas sudut rotor pada gambar 2 merupakan sebagian generator yang ditampilkan karena sistem Ambon, Haruku, dan Saparua menggunakan pembangkit daya PLTD dengan banyak unit pembangkit yang kapasitasnya kecil sehingga dipilih 3 generator yang sudut rotornya berbeda. Dari gambar 2 hasil simulasi 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 yang cukup lama setelah mengalami osilasi panjang sebagai akibat dari sistem peredaman gangguan oleh aksi kontrol governor.

Pada tabel II ditunjukkan kondisi pemulihan sudut rotor generator kembali pada kondisi sinkronnya setelah mengalami osilasi panjang yaitu G1 selama 3,467; G29 selama 5,522, dan G33 selama 4,897detik setelah gangguan dihilangkan.

C. Stabilitas Frekuensi Sebelum Interkoneksi

Sebelum terjadi gangguan frekuensi generator 1, 29, dan 33, berada pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz, hingga terjadi gangguan pada detik 1. Hasil simulasi stabilitas

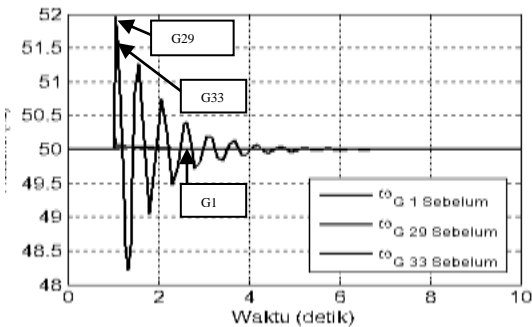
frekuensi sebelum interkoneksi ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar. 2. Grafik sudut rotor $f(t)$ pada generator 1, 29, dan 33 sebelum interkoneksi

TABEL II
STABILITAS SUDUT ROTOR SEBELUM INTERKONEKSI

Generator	Ayunan	δ Awal (derajat)	δ Selama Gangguan (derajat)	δ Baru (derajat)	$t_{Steady State}$ (detik)
G 1	Maks	29,17	33,88	32,35	3,467
	Min	-	-		
G 29	Maks	45,11	35,5	72,22	5,522
	Min	-	27,68		
G 33	Maks	-	1,09	6,161	4,897
	Min	42,98	23,42		



Gambar. 3. Grafik frekuensi $f(t)$ pada generator 1, 29, dan 33

Gambar 3 menunjukkan grafik hasil simulasi frekuensi fungsi waktu saat sistem mengalami gangguan. Terlihat bahwa frekuensi mengalami osilasi panjang dan dapat kembali stabil pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz setelah beberapa detik kemudian. Waktu pemulihan frekuensi ditunjukkan dalam bentuk tabel pada tabel III.

TABEL III
STABILITAS FREKUENSI SEBELUM INTERKONEKSI

Generator	Ayunan	f Selama Gangguan (Hz)	$f_{Steady State}$ (Hz)	$t_{Steady State}$ (detik)
G 1	Maks	50,12	50	3,722
	Min	-		
G 29	Maks	52,17	50	5,522
	Min	48,26		
G 33	Maks	51,83	50	3,836
	Min	48,36		

Pada tabel III terlihat bahwa saat sistem mengalami gangguan, frekuensi mengalami osilasi dan dapat

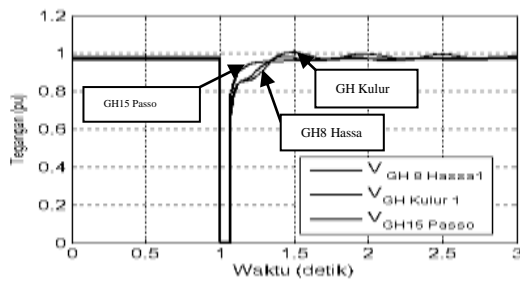
kembali stabil pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz, dengan waktu pemulihan untuk G1 selama 3,722 detik, G29 selama 5,522 detik, dan G33 selama 3,838 detik, setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

D. Stabilitas Tegangan Sebelum Interkoneksi

Hasil analisis stabilitas tegangan sebelum interkoneksi ditunjukkan pada tabel IV.

TABEL IV
STABILITAS TEGANGAN SEBELUM INTERKONEKSI

Bus	V drop (pu)	V Steady State (pu)	$t_{Steady State}$ (detik)
Generator			
G 1	0,01	1	4,517
G 29	0,01	1	3,917
G 33	0,3	1	2,617

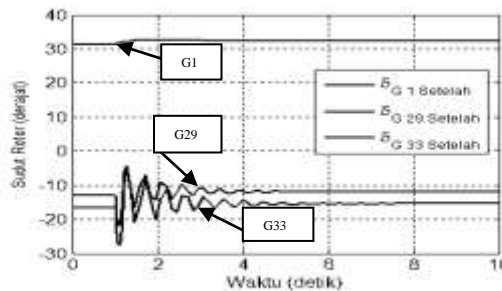


Gambar. 4. Grafik tegangan $f(t)$ pada GH15 Passo, GH8 Hassa, dan GH Kulur

Dari Gambar 4 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 p.u setelah mengalami osilasi tegangan yaitu dengan waktu pemulihan untuk bus G1 selama 4,517, G29 selama 3,917, G33 selama 2,617, detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem. Ketiga bus generator ini sebelum terjadi gangguan semuanya bekerja pada tegangan 1 p.u., hingga terjadi gangguan pada detik 1.

E. Stabilitas Sudut Rotor Setelah Interkoneksi

Stabilitas sudut rotor setelah interkoneksi ditunjukkan pada gambar 5. Stabilitas generator yang dibahas adalah stabilitas sudut rotor pada generator 1, 29, dan 33.



Gambar. 5. Grafik Sudut Rotor $f(t)$ pada generator 1, 29, dan 33,

Dari gambar 5 hasil simulasi grafik sudut rotor fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada tabel V yang mengalami gangguan pada detik 1, sudut rotor mengalami

perubahan dan dapat kembali stabil dengan sudut yang baru, dengan waktu pemulihan yang cukup cepat setelah mengalami osilasi pendek sebagai akibat dari sistem peredaman gangguan oleh aksi governor.

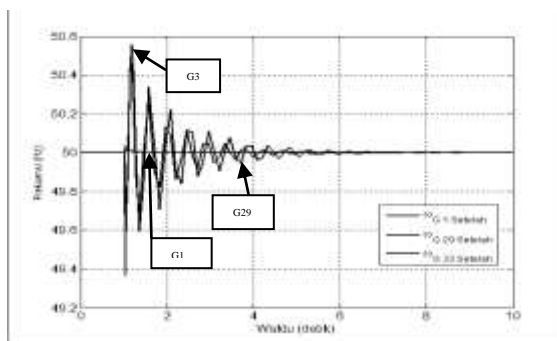
TABEL V
STABILITAS SUDUT ROTOR SETELAH INTERKONEKSI

Generator	Ayunan	δ Selama	δ Baru	t_{Steady}
		Gangguan ($^{\circ}$)	($^{\circ}$)	State (detik)
G 1	Maks	33,25	31,16	5,509
	Min			
G 29	Maks	9,3	-12,96	7,959
	Min			
G 33	Maks	5,8	-16,23	5,709
	Min	-3,2		

Tabel V menunjukkan bahwa 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 7,917, G29 selama 8,917, dan G33, selama 6,917 setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

F. Stabilitas Frekuensi Setelah Interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas frekuensi setelah interkoneksi ditunjukkan pada Gambar 6 untuk generator 1, 29, dan 33.



Gambar. 6. Grafik Frekuensi f(t) pada generator 1, 29, dan 33

Dari gambar 6 hasil simulasi grafik frekuensi fungsi waktu saat sistem mengalami gangguan, frekuensi mengalami osilasi panjang dengan perubahan frekuensi tidak terlalu besar dan dapat kembali stabil pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz setelah beberapa detik kemudian. Waktu pemulihan frekuensi ditunjukkan pada tabel IV.

TABEL VI
STABILITAS FREKUENSI SETELAH INTERKONEKSI

Generator	Ayunan	f Selama	f_{Steady}	t_{Steady}
		Gangguan (Hz)	State (Hz)	State (detik)
G 1	Maks	50,04	50	3,584
	Min	-		
G 29	Maks	50,46	50	5,959
	Min	49,43		
G 33	Maks	50,43	50	5,209
	Min	49,65		

Pada tabel VI yang menunjukkan 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 3,584 detik,

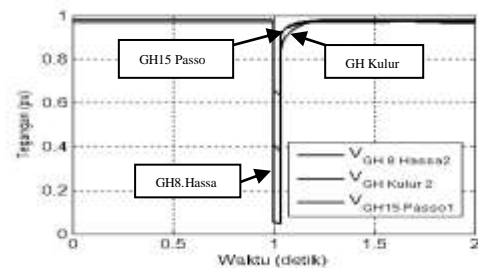
G29 selama 5,959 detik, G33 selama 5,209 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

G. Stabilitas Tegangan Setelah Interkoneksi

Hasil analisis stabilitas tegangan setelah interkoneksi ditunjukkan pada tabel VII dan gambar 7 untuk bus GH15 Passo, GH8 Hassa, GH Kulur.

TABEL VII
STABILITAS TEGANGAN SETELAH INTERKONEKSI

Bus Generator	V_{drop}	V_{Steady}	t_{Steady}
	(pu)	(pu)	(pu)
G 1	0,6287	0,969	0,285
G 29	0,38	0,979	2,334
G 33	0,03	0,967	0,73



Gambar. 7. Grafik tegangan f(t) pada bus generator 1, 29 dan 33

Hasil simulasi grafik tegangan fungsi waktu ditunjukkan pada Tabel VII yang menunjukkan bahwa saat sistem mengalami gangguan pada detik 1, tegangan mengalami *drop* dan dapat kembali stabil pada tegangan kerja yaitu 1 p.u., dengan waktu pemulihan untuk bus G1 selama 0,285 detik, G29 selama 2,334 detik, dan G33 selama 0,73 detik, setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

TABEL VIII
PERBANDINGAN STABILITAS SUDUT ROTOR

Generator	Sebelum Interkoneksi		Setelah Interkoneksi	
	δ (derajat)	t_{Steady} (detik)	δ (derajat)	t_{Steady} (detik)
G 1	38,36	4,563	32,67	2,334
G 29	67,38	5,438	-15,2	4,334
G 33	57,53	4,188	-12,22	1,584

H. Perbandingan Stabilitas Sudut Rotor, Frekuensi dan Tegangan.

TABEL IX
PERBANDINGAN STABILITAS TEGANGAN

Bus	Sebelum Interkoneksi		Setelah Interkoneksi	
	V (pu)	t_{Steady} (detik)	V (pu)	t_{Steady} (detik)
G 1	0,9689	0,581	0,969	0,285
G 29	0,9665	0,73	0,967	2,334
G 33	0,9807	0,73	0,979	0,73

Berdasarkan hasil analisis stabilitas sistem daya pada sistem kelistrikan sebelum dan setelah interkoneksi maka dapat diperoleh gambaran umum tentang stabilitas sistem daya seperti ditunjukkan pada tabel VIII stabilitas sudut rotor, tabel IX stabilitas tegangan, dan tabel X stabilitas frekuensi.

Dari tabel-tabel tersebut terlihat bahwa osilasi tegangan yang membawa dampak pada osilasi tegangan

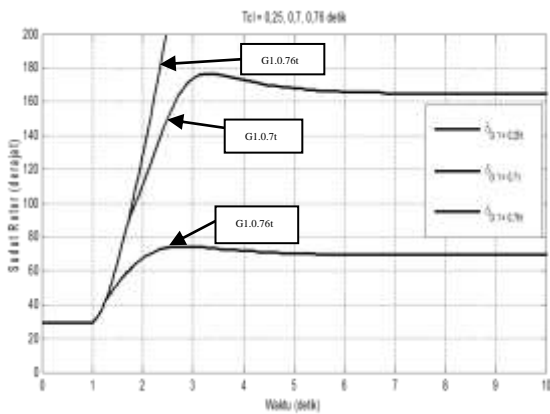
dan frekuensi terlihat cukup panjang dan berubahannya cukup besar saat sebelum sistem terinterkoneksi. Setelah sistem terinterkoneksi terjadi peredaman osilasi yang cepat sehingga perubahan ayunan dan sinkronisasi tidak terlalu besar. Hal ini menunjukkan kondisi sistem cukup baik setelah sistem terinterkoneksi.

TABEL X
PERBANDINGAN STABILITAS FREKUENSI

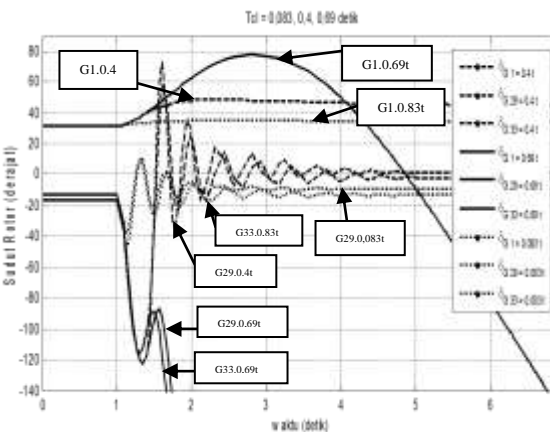
Generator	Sebelum Interkoneksi		Setelah Interkoneksi	
	f (Hz)	t Steady State (detik)	f (Hz)	t Steady State (detik)
G 1	50	3,722	50	3,584
G 29	50	5,522	50	5,959
G 33	50	3,836	50	5,209

I. Waktu Pemutus Kritis

Waktu pemutusan kritis pada sistem kelistrikan sebelum dan setelah interkoneksi ditampilkan pada Gambar 8 dan gambar 9. Waktu pemutusan kritis diperoleh secara *trial and error* dengan mengubah-ubah nilai waktu gangguan.



Gambar 8. Grafik Sudut Rotor f(t) pada Generator 1, 29, dan 33 sebelum interkoneksi



Gambar 9. Grafik Sudut Rotor f(t) pada Generator 1, 29 dan 33 setelah interkoneksi

Pada sistem sebelum interkoneksi dilakukan simulasi waktu pemutus kritis dengan durasi pada generator G1 selama 0,25 detik, G29 selama 0,76 detik, dan G33 selama 0,76 detik. Waktu gangguan ketika sudut rotor mengalami lepas sinkron adalah selama 0,76 detik.

Setelah interkoneksi dilakukan simulasi waktu pemutus kritis dengan durasi pada generator G1 selama 0,083 detik, generator G29 selama 0,4 detik, dan generator G33 selama 0,69 detik. Waktu gangguan ketika sudut rotor mengalami lepas sinkron pada sistem adalah selama 0,69 detik. Waktu pemutus kritis pada sistem setelah interkoneksi lebih cepat dibandingkan pada sistem sebelum interkoneksi.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pembahasan sistem tenaga listrik di Propinsi Maluku, dapat diambil kesimpulan berikut:

1. Hasil analisis aliran daya sistem sebelum interkoneksi menunjukkan rugi-rugi daya aktif sebesar 4,26% dan reaktif sebesar 29%, dengan penurunan tegangan terbesar yaitu 5.4%.
2. Kondisi sistem terbaik setelah interkoneksi diperoleh dengan menggunakan skenario-3, yaitu menggunakan tegangan kabel bawah laut 20kV, dengan hubungan langsung ke bus PLTD tanpa melalui beban.
3. Kondisi sistem terbaik pada skenario-3 ditunjukkan dengan kondisi penurunan rugi-rugi daya serta penurunan tegangan tertinggi yang paling kecil dibandingkan dengan skenario yang lain, penurunan tegangan tertinggi sebesar 4,93%, dan penurunan rugi-rugi daya aktif sebesar 2.91% dan daya reaktif sebesar 23%.
4. Pada saat terjadi gangguan, stabilitas sistem daya setelah interkoneksi berada dalam kondisi stabil, yang ditunjukkan dari kondisi sudut rotor, tegangan, dan frekuensi yang dapat kembali pada operasi normalnya lebih cepat jika dibandingkan dengan sistem daya sebelum interkoneksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marsudi, Dj. 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*, Graha Ilmu, Jakarta.
- [2] Kundur, P. 2004. Definition and Classification of Power System Stability, *IEEE Transactions on Power Systems*. Vo. 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] Arkell, C.A. *dkk.*, 1989. Design, manufacture and installation of 150 kV submarine cable system for the Java-Madura interconnection, *IEEE Proceceedings*, Vol. 136, Pt. C, No. 3
- [5] PLN, 2011. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL), Tahun 2011-2020, Jakarta
- [6] Saadat Hadi. 1999. *Power System Analisis*. Milwake School of Engineering, New York
- [7] Grigsby, L.L. 2007. *Power system Stability and Control*, Taylor & Francis Group, LLC., New York
- [8] Kadir, A. 2006. *Distribusi dan Utilisasi Tenaga Listrik*. Universitas Indonesia. Jakarta. .
- [9] Mahmoodi, T dan M. Roveri. 2012, Identifying Network Failure via Detecting Changes in Power Profile. *IEEE. Second International Workshop*. 758.
- [10] Mahmoodi, T dan M. Roveri. 2012, Identifying Network Failure via Detecting Changes in Power Profile. *IEEE. Second International Workshop*. 758.