

# Analisis Stabilitas Sistem Daya pada Interkoneksi PLTMH Ampelgading di Gardu Induk Turen

Hadi Suyono, Rini Nur Hasanah, Teguh Utomo, dan Markus D. Letik

**Abstrak**—Kebutuhan akan energi listrik yang terus meningkat saat ini membutuhkan suatu kontinuitas pelayanan oleh penyedia tenaga listrik. Kontinuitas pelayanan dimaksud terkait dengan stabilitas sistem daya dan kualitas daya listrik yang disalurkan ke konsumen. Gardu Induk Turen merupakan salah satu Gardu Induk dalam wilayah Area Pelayanan Jaringan (APJ) Malang, yang berfungsi untuk mensuplai beban pada 10 penyulang yang terhubung dengan Gardu Induk. Salah satu bus dengan tegangan 20 kV terinterkoneksi dengan Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) Ampelgading. Adanya interkoneksi PLTM tersebut akan mempengaruhi sistem, ditinjau dari keadaan tunak (*steady state*) ataupun stabilitas. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini adalah aliran daya dan stabilitas sudut rotor pada saat terjadi gangguan untuk kondisi sebelum dan sesudah interkoneksi. Disamping itu, waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) juga ditentukan untuk mengetahui ketahanan sistem. Sistem kontrol pada busbar PLTM yaitu sistem eksitasi dan Turbine Governor juga dianalisis untuk perbaikan kontrol tegangan dan frekuensi. Hasil analisis *steady state* menunjukkan bahwa interkoneksi PLTM Ampelgading di Gardu Induk Turen memberikan perbaikan profil tegangan bus Gardu Induk sebesar 8,11%, sementara waktu pemulihan sudut rotor generator yang dilengkapi dengan *Turbine Governor* adalah 4,004 detik dan waktu pemutusan kritis generator adalah 0,290 detik sesudah gangguan.

**Kata Kunci** - PLTM, interkoneksi, analisis keadaan tunak, stabilitas sudut rotor, stabilitas frekuensi, stabilitas tegangan

## I. PENDAHULUAN

SALAH satu sumber energi alternatif dari energi terbarukan (*renewable energi*) yang mulai dikembangkan adalah pembangkit listrik tenaga air, dalam hal ini PLTA mikrohidro dan PLTA skala mini. Pembangkit-pembangkit tersebut dapat diinterkoneksi dengan saluran distribusi (*grid*), sehingga dapat menjadi pembangkit energi listrik skala kecil tersebar atau pembangkit tersebar.

Di Kabupaten Malang telah dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Air skala Mini (PLTM) di Kecamatan Ampelgading, dengan kapasitas 10 MW. PLTM ini

Hadi Suyono, Rini Nur Hasanah, Teguh Utomo adalah Dosen pada Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang sedangkan, Markus D. Letik adalah mahasiswa lulusan pada Program Magister Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang dan juga sebagai dosen di Politeknik Negeri Kupang.

selanjutnya diinterkoneksi dengan salah satu bus tegangan menengah 20 kV, dari gardu induk (GI) Turen, yang merupakan salah satu Gardu Induk yang ada dalam wilayah APJ Malang, yang mendapat suplai daya dari Gardu Induk Kebonagung melalui saluran transmisi 70 kV, yang selanjutnya GI Turen berfungsi untuk mensuplai daya beban pada 10 penyulang. Terinterkoneksinya PLTM Ampelgading dengan Gardu Induk Turen, menyebabkan PLTM tersebut berfungsi sebagai pembangkit tersebar atau *Distributed Generation* (DG) yang berdampak pada stabilitas sistem. Dalam proses interkoneksi antara DG dan jaringan distribusi, pemanfaatan sejumlah kecil unit DG dengan kapasitas daya yang kecil jika dibandingkan dengan pembangkit listrik besar yang terpusat, tidak akan mempengaruhi pengoperasian dari jaringan dan karenanya dampak DG dapat diabaikan. Namun, ketika jaringan terinterkoneksi dengan sejumlah besar unit DG, dengan kapasitas yang lebih besar, maka DG akan mempengaruhi stabilitas sistem daya secara keseluruhan, khususnya stabilitas transien [1]. Demikian pula sebaliknya, adanya variasi beban dan gangguan yang terjadi pada sistem yang terinterkoneksi dengan DG, akan mempengaruhi stabilitas serta respon transien dari DG [2]. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui stabilitas interkoneksi sistem daya di GI Turen berdasarkan analisis aliran daya sebelum dan setelah interkoneksi, stabilitas tegangan, sudut rotor dan frekuensi generator akibat gangguan pada GI dengan adanya interkoneksi dari PLTMH.

## II. DISTRIBUTED GENERATION

Pengaruh DG pada stabilitas sistem daya listrik, menyimpulkan bahwa, penyimpangan sudut daya maksimum antara generator semakin berkurang dengan bertambahnya level penetrasi DG dan juga respon frekuensi yang lebih cepat dengan penyimpangan frekuensi maksimum yang lebih tinggi, ketika DG lain dioperasikan [3]. Lokasi penempatan DG juga mempengaruhi keandalan dan efisiensi daya dengan variasi pembebanan dan mengurangi rugi-rugi daya [4]. Stabilitas DG selama kondisi gangguan menggunakan tuning kontrol PID berdasarkan pada metode Ziegler-Nichols, dengan melakukan simulasi pada standar IEEE untuk 13 titik feeder distribusi, mengatakan bahwa, variasi beban dan gangguan akan mempengaruhi stabilitas serta respon transien dari DG [5].

### III. ANALISIS STEADY STATE

Sistem tenaga listrik adalah sebuah sistem jaringan yang membawa tenaga listrik. Oleh karena itu, setiap titik/bus terdapat daya aktif P, daya reaktif Q dan tegangan E. Tegangan biasanya dinyatakan dalam besar dan sudut fasanya ( $\delta$ ). Jadi pada setiap bus terdapat empat besaran yaitu P, Q, E dan  $\delta$ . Di dalam studi aliran daya, dua dari keempat besaran itu diketahui, dan dua yang lain perlu dicari. Berdasarkan hal tersebut di atas, bus-bus dibedakan menjadi tiga jenis yaitu bus beban, bus generator, dan bus berayun (*slack bus*). Persamaan unjuk kerja sistem tenaga listrik dapat dinyatakan dalam bentuk impedansi bus ( $Z_{bus}$ ) atau admitansi bus ( $Y_{bus}$ ) sebagai berikut:

$$\text{dalam bentuk impedansi: } E_{bus} = Z_{bus} I_{bus} \quad (1)$$

$$\text{dalam bentuk admitansi: } I_{bus} = Y_{bus} E_{bus} \quad (2)$$

Matrik admitansi bus dan matrik impedansi bus dapat disusun dengan atau tanpa melibatkan bus tanah. Jika bus tanah tidak dilibatkan dalam menyusun matrik  $Z_{bus}$  atau  $Y_{bus}$  diatas, maka perlu dipilih satu bus sebagai acuan dan elemen vektor tegangan  $E_{bus}$  dalam kedua persamaan diatas merupakan beda tegangan antara sesuatu bus dengan bus acuan. Pada suatu bus p, daya aktif dan reaktif dinyatakan sebagai :

$$P_p - jQ_p = E_p^* I_p \quad (3)$$

dimana

$P_p$  : Daya aktif pada bus p (W)

$Q_p$  : Daya reaktif pada bus p (VAr)

$E_p$  : Tegangan pada bus p dengan sudut fasa (V)

$I_p$  : Arus pada bus p (A)

dan arus pada bus p adalah

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} \quad (4)$$

$I_p$  adalah positif jika arus itu mengalir masuk kedalam sistem. Jika elemen-elemen shunt terhadap tanah dilibatkan dalam menyusun matrik  $Z_{bus}$  atau  $Y_{bus}$ , maka persamaan (4) menyatakan arus total yang mengalir dari bus p, sedangkan jika tidak dilibatkan dalam menyusun kedua matrik tersebut, maka arus total yang mengalir melalui bus p adalah:

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} - y_p E_p \quad (5)$$

dimana  $y_p$  menyatakan total admitansi shunt bus p terhadap tanah dan  $y_p E_p$  menyatakan arus yang mengalir dari bus p ke tanah. Setelah proses iterasi untuk mengetahui tegangan setiap bus selesai, daya yang mengalir pada setiap saluran dapat dihitung. Arus yang mengalir dari bus p ke bus q adalah

$$i_{pq} = (E_p - E_q) y_{pq} + E_p \frac{y'_{pq}}{2} \quad (6)$$

dimana

$i_{pq}$  : Arus yang mengalir dari bus p ke bus q (A)

$y_{pq}$  : Admitansi cabang yang menghubungkan bus p dengan bus q (mho)

$y'_{pq}$  : Total admitansi shunt saluran pq (mho)

Daya yang mengalir dari bus p ke bus q adalah

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* i_{pq} \quad (7)$$

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* (E_p - E_q) y_{pq} + E_p^* E_p \frac{y'_{pq}}{2} \quad (8)$$

sedangkan daya yang mengalir dari bus q ke bus p adalah:

$$P_{qp} - jQ_{qp} = E_q^* (E_q - E_p) y_{pq} + E_q^* E_q \frac{y'_{pq}}{2} \quad (9)$$

dimana

$P_{qp}$  : Daya aktif pada bus q ke p (W)

$Q_{qp}$  : Daya reaktif pada bus q ke p (VAr)

$E_p$  : Tegangan pada bus p dengan sudut fasa (V)

### IV. ANALISIS DINAMIS SISTEM DAYA

#### A. Stabilitas Sudut Rotor

Stabilitas sudut rotor berkaitan dengan kemampuan mesin sinkron yang saling berhubungan dalam suatu sistem daya, untuk tetap berada pada keadaan sinkronisasi dalam kondisi operasi norma setelah terjadi gangguan. Hal itu tergantung pada kemampuan untuk mempertahankan atau memulihkan keseimbangan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik dari setiap mesin sinkron dalam sistem. Ketidakstabilan yang terjadi dapat mengakibatkan peningkatan ayunan sudut dari beberapa generator, sehingga menyebabkan hilangnya sinkronisasi dengan generator lain [6].

Stabilitas sistem daya tergantung pada keberadaan kedua komponen torsi di atas untuk masing-masing mesin sinkron. Kurangnya torsi sinkronisasi akan menghasilkan ketidakstabilan yang tidak periodik atau *non-osilasi*, sedangkan kurangnya torsi redaman akan menghasilkan ketidakstabilan yang berosilasi. Osilasi rotor yang mengiringi suatu gangguan juga menghasilkan osilasi pada daya yang dihasilkan. Kondisi dari variasi daya dapat menjadi sumber yang berguna untuk melakukan pendekatan dan sebagai informasi tentang batas stabilitas peralihan.

#### B. Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi merupakan suatu kemampuan sistem daya untuk menjaga frekuensi tetap stabil dalam kisaran nominal [5]. Hal itu tergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem generator dan beban, dengan rugi-rugi minimal pada beban. Gangguan sistem yang parah umumnya mengakibatkan perubahan besar terhadap frekuensi, arus aliran daya, tegangan, dan variabel sistem lainnya, sehingga memerlukan tindakan proses, kontrol, dan proteksi yang tidak dimodelkan dalam stabilitas yang konvensional atau studi stabilitas tegangan. Umumnya, masalah stabilitas frekuensi berkaitan dengan ketidakmampuan tanggapan peralatan, koordinasi yang buruk dalam kontrol dan peralatan proteksi, atau cadangan generator / pembangkit tidak mencukupi.

Selama ketidakstabilan frekuensi, waktu karakteristik proses dan perangkat yang diaktifkan oleh pergeseran besar frekuensi dan variabel sistem lainnya akan

berkisar pada hitungan detik, sesuai dengan tanggapan dari perangkat seperti kontrol dan proteksi generator, hingga beberapa menit, sesuai dengan tanggapan perangkat seperti sistem penggerak utama pemasok daya dan regulator tegangan beban. Meskipun stabilitas frekuensi 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 biasanya dikaitkan dengan kelompok mesin yang berayun relatif terhadap kelompok lain melintasi jalur transmisi yang relatif lemah. Mode elektromekanis frekuensi yang lebih tinggi (1-2 Hz) biasanya melibatkan satu atau dua generator yang berayun terhadap seluruh sistem daya atau mesin listrik yang berayun satu sama lain.

C. Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan berkaitan dengan kemampuan suatu sistem daya untuk menjaga tegangan tetap stabil pada semua bus dalam system pada kondisi operasi normal dan setelah terjadi gangguan. Ketidakstabilan yang terjadi akan mengakibatkan tegangan turun atau tegangan naik pada beberapa bus. Akibat yang mungkin timbul dari ketidakstabilan tegangan adalah hilangnya beban di daerah dimana tegangan mencapai nilai rendah yang tidak dapat diterima atau hilangnya integritas sistem daya. Faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan tegangan biasanya jatuh tegangan yang terjadi ketika aliran daya aktif dan reaktif melalui reaktansi induktif yang terkait dengan jaringan transmisi, dimana hal ini membatasi kemampuan jaringan transmisi untuk mentransfer daya.

V. HASIL DAN ANALISIS

A. Simulasi Aliran Daya

Hasil simulasi aliran daya untuk system GI Turen diberikan pada Tabel I, II, III dan Tabel IV.

TABEL I  
ALIRAN DAYA GI SEBELUM INTERKONEKSI

Bus	V (p.u.)	Phase (rad)	Pgen (p.u.)	Qgen (p.u.)	Pload (p.u.)	Qload (p.u.)
Bus 1	1,000	0,000	0,255	0,189	0,000	0,000
Bus 2	0,924	-0,106	0,000	0,000	0,004	0,002
Bus 3	0,924	-0,106	0,000	0,000	0,172	0,101
Bus 4	0,924	-0,106	0,000	0,000	0,076	0,045

Total pembangkitan P = 0,2559 p.u. dan Q = 0,1892 p.u.  
Total Beban P = 0,2538 p.u. dan Q = 0,1493 p.u.  
Total rugi-rugi P = 0,0021 p.u. dan Q = 0,0399 p.u.

Dari data aliran daya di GI Turen sebelum interkoneksi dan sesudah interkoneksi seperti pada Tabel I dan Tabel II, dapat dilihat bahwa interkoneksi dengan PLTM Ampelgading menyebabkan tegangan pada bus GI, khususnya pada bus-2, bus-3 dan bus-4, yang semula rata-rata 0,924 p.u naik menjadi 0,999 p.u. Hal ini berarti bahwa interkoneksi dengan PLTM menyebabkan peningkatan profil tegangan bus sebesar 8,11%. Adanya suplai daya dari PLTM dapat dilihat

dari aliran daya antar bus GI seperti pada Tabel III dan Tabel IV. Aliran daya dari bus-1 ke bus-2 sebelum interkoneksi 0,15349 p.u turun menjadi 0,14408 p.u sesudah interkoneksi. Demikian juga aliran daya dari bus-1 ke bus-4, yang sebelum interkoneksi sebesar 0,10243 p.u turun menjadi 0,09665 p.u sesudah interkoneksi.

TABEL II  
ALIRAN DAYA GI SESUDAH INTERKONEKSI

Bus	V (p.u.)	Phase (rad)	Pgen (p.u.)	Qgen (p.u.)	Pload (p.u.)	Qload (p.u.)
Bus 1	1,000	0,000	0,240	0,001	0,000	0,000
Bus 2	0,999	-0,096	0,000	0,000	0,004	0,002
Bus 3	0,999	-0,096	0,000	0,000	0,172	0,101
Bus 4	0,999	-0,096	0,000	0,000	0,076	0,045
Bus 5	1,000	-0,097	0,014	0,170	0,000	0,000

Total pembangkitan P = 0,2551 p.u. dan Q = 0,1714 p.u.  
Total Beban P = 0,2538 p.u. dan Q = 0,1493 p.u.  
Total rugi-rugi P = 0,0013 p.u. dan Q = 0,0221 p.u.

TABLE III  
ALIRAN DAYA ANTAR BUS GI SEBELUM INTERKONEKSI

Dari	Ke	P (p.u)	Q (p.u)
Bus 3	Bus 4	-0,02495	-0,01498
Bus 2	Bus 3	0,14752	0,08617
Bus 1	Bus 2	0,15349	0,11322
Bus 1	Bus 4	0,10243	0,07601
Bus 4	Bus 3	0,02495	0,01464
Bus 3	Bus 2	-0,14743	-0,08642
Bus 2	Bus 1	-0,15228	-0,08897
Bus 4	Bus 1	-0,10162	-0,05974

TABLE IV  
ALIRAN DAYA ANTAR BUS GI SESUDAH INTERKONEKSI

Dari	Ke	P (p.u)	Q (p.u)
Bus 3	Bus 4	-0,03380	-0,11716
Bus 2	Bus 3	0,13863	-0,01611
Bus 4	Bus 5	-0,01433	-0,17092
Bus 1	Bus 2	0,14408	0,00053
Bus 1	Bus 4	0,09665	0,00031
Bus 4	Bus 3	0,03384	0,11679
Bus 3	Bus 2	-0,13858	0,01576
Bus 5	Bus 4	-0,01440	0,17060
Bus 2	Bus 1	-0,14339	0,01331
Bus 4	Bus 1	-0,09618	0,00903

B. Stabilitas Sudut Rotor sebelum Interkoneksi

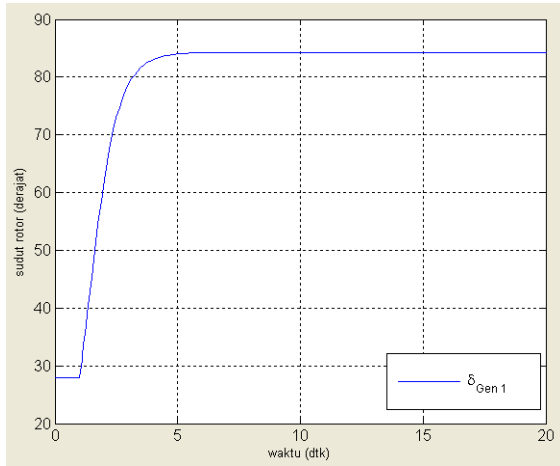
Hasil simulasi stabilitas sudut rotor pada sistem daya di Gardu Induk Turen sebelum interkoneksi ditunjukkan pada Gambar 1.

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa sebelum terjadi gangguan, sudut rotor generator sebesar 27,88°. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan yang besar, hingga mencapai nilai maksimum sebesar 84,16° saat 5,504 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali pada operasi normal dengan titik kerja yang baru yaitu pada 84,16°.

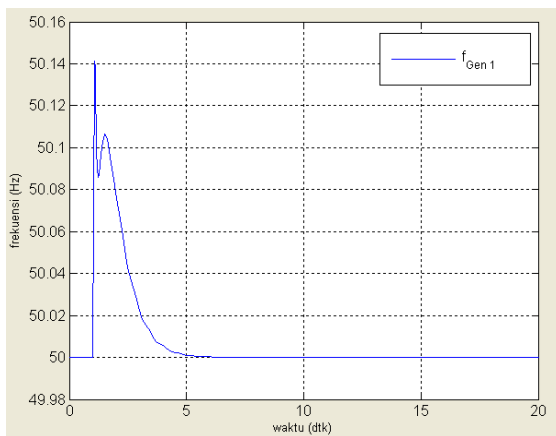
C. Stabilitas Frekuensi sebelum Interkoneksi

Sebelum terjadi gangguan, generator beroperasi

sesuai dengan frekuensi dasar sistem yaitu 50 Hz. Namun ketika terjadi gangguan, generator mengalami perubahan frekuensi hingga mencapai nilai 50,14 Hz pada detik ke-1,083 setelah terjadi gangguan. Kemudian nilai frekuensi turun hingga mencapai operasi normalnya selama 5,879 detik setelah gangguan dihilangkan (diberikan pada Gambar 2).

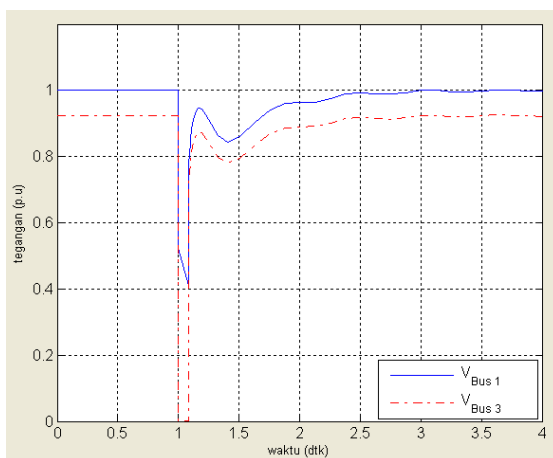


Gambar 1 Sudut rotor = f(t) pada generator Gen-1.



Gambar 2 Grafik frekuensi = f(t) pada generator Gen-1

**D. Stabilitas Tegangan sebelum Interkoneksi**

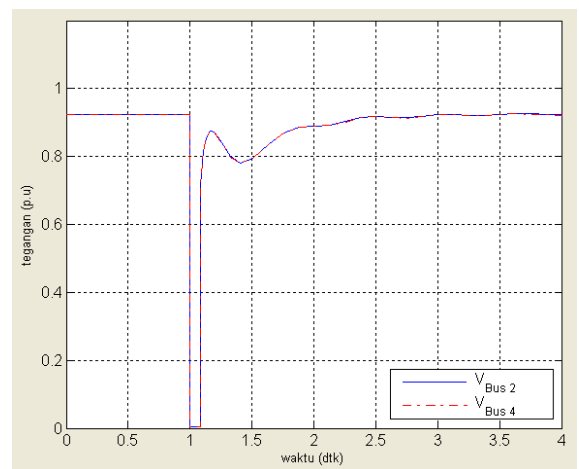


Gambar 3 Grafik tegangan = f(t) pada bus-1 dan bus-3

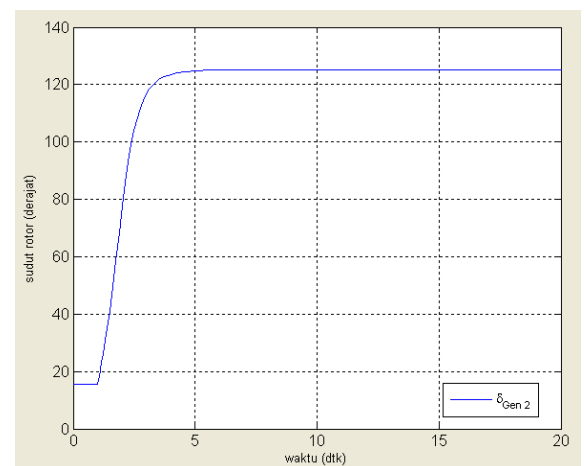
Stabilitas tegangan yang dibahas adalah stabilitas tegangan pada bus-bus GI pada saat terjadi gangguan, yaitu bus-1 sampai dengan bus-4, dalam kondisi

sebelum interkoneksi. Hasil simulasi stabilitas tegangan pada bus-1 dan bus-3 ditunjukkan pada Gambar 3, dimana dapat dilihat bahwa besarnya tegangan pada bus-1 sebelum terjadi gangguan adalah 1 p.u, namun saat terjadi gangguan pada detik ke-1 tegangan pada bus-1 mengalami penurunan yang besar hingga mencapai 0,0409 p.u.

Pada bus-3, penurunan tegangannya lebih besar dari pada bus-1 maupun dari bus-2 dan bus-4. Seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3, saat terjadi gangguan, tegangan yang awalnya sebesar 0,924 p.u. turun menjadi 0,0014 p.u. Namun sama seperti pada bus-1, hal ini juga tidak berlangsung lama, karena setelah gangguan dihilangkan, tegangan mengalami osilasi dalam waktu singkat, sebelum menjadi normal kembali. Untuk hasil simulasi stabilitas tegangan pada bus-2 dan bus-4 dapat dilihat Gambar 4.



Gambar 4 Grafik tegangan = f(t) pada bus-2 dan bus-4



Gambar 5 Grafik sudut rotor = f(t) pada generator Gen-2

Pada saat terjadi gangguan, tegangan pada bus-2 dan bus-4 yang semula 0,924 p.u mengalami penurunan yang hampir sama besarnya, yaitu tegangan bus-2 turun menjadi 0,0035 p.u dan tegangan bus-4 turun menjadi 0,0032 p.u. Penurunan tegangan ini tidak berlangsung lama, karena setelah gangguan dihilangkan dari sistem maka baik tegangan bus-2 maupun tegangan bus-4 kembali menjadi normal, setelah mengalami sedikit osilasi.

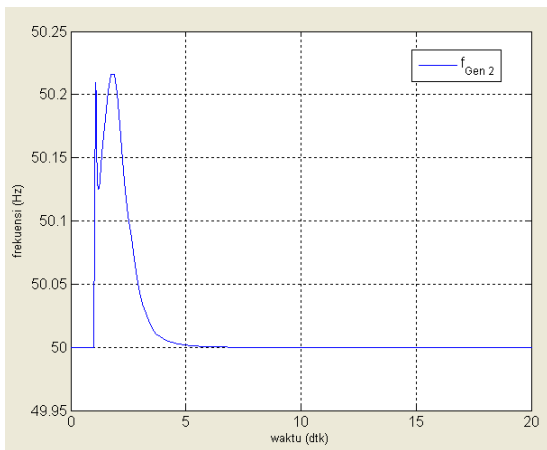
E. Stabilitas Sudut Rotor sesudah Interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas sudut rotor pada sistem daya di Gardu Induk Turen sebelum interkoneksi ditunjukkan pada Gambar 5.

Dari tersebut sebelum terjadi gangguan, sudut rotor generator Gen-2 sebesar 15,39°. Ketika terjadi gangguan pada detik ke-1, sudut rotor generator mengalami perubahan yang besar, hingga mencapai nilai maksimum sebesar 124,8° saat 5,004 detik setelah gangguan. Setelah gangguan dihilangkan dari sistem, sudut rotor generator kembali pada operasi normal dengan titik kerja yang baru yaitu pada 124,8°.

F. Stabilitas Frekuensi sesudah interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas frekuensi sistem daya di Gardu Induk Turen ditunjukkan pada Gambar 6. Sebelum terjadi gangguan, generator Gen-2 beroperasi sesuai dengan frekuensi dasar sistem yaitu 50 Hz. Namun ketika terjadi gangguan, generator mengalami perubahan frekuensi hingga mencapai nilai 50,22 Hz pada detik ke-1,504 setelah terjadi gangguan. Kemudian nilai frekuensi turun hingga mencapai operasi normalnya selama 4,125 detik setelah gangguan dihilangkan.



Gambar 6 Grafik frekuensi = f (t) pada generator Gen-2

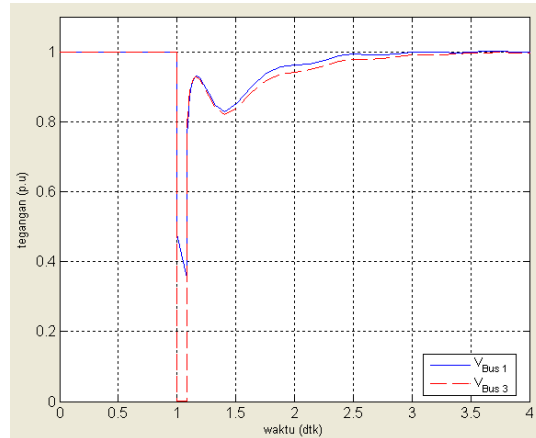
G. Stabilitas Tegangan sesudah Interkoneksi

Hasil simulasi stabilitas tegangan pada bus-1 dan bus-3 ditunjukkan dalam Gambar 7, dimana dapat dilihat bahwa besarnya tegangan pada bus-1 sebelum terjadi gangguan adalah 1 p.u. Saat terjadi gangguan pada detik ke-1 tegangan pada bus-1 mengalami penurunan yang besar hingga mencapai 0,0352 p.u.

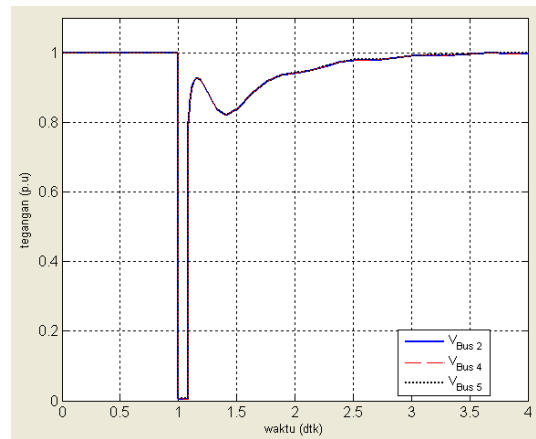
Pada bus-3, penurunan tegangannya lebih besar dari pada bus-1, dimana saat terjadi gangguan, tegangan yang awalnya sebesar 0,999 p.u. turun menjadi 0,0018 p.u. Sama seperti pada bus-1, penurunan tegangan pada bus-3 ini juga tidak berlangsung lama, karena setelah gangguan dihilangkan, tegangan mengalami osilasi dalam waktu singkat, sebelum menjadi normal kembali.

Hasil simulasi stabilitas tegangan pada bus-2, bus-4 dan bus-5 dapat dilihat pada Gambar 8. Pada saat terjadi gangguan, tegangan pada bus-2 dan bus-4 yang semula 0,999 p.u mengalami penurunan yang hampir sama besarnya, yaitu tegangan bus-2 turun menjadi 0,0037 p.u

dan bus-4 turun menjadi 0,0047 p.u, sementara untuk tegangan pada bus-5 yang awalnya 1 p.u, tegangannya turun menjadi 0,0064 p.u. Penurunan tegangan pada bus-2, bus-4 dan bus-5 kembali kepada kondisi normal setelah gangguan dihilangkan dari sistem setelah mengalami sedikit osilasi.



Gambar 7 Grafik tegangan = f (t) pada bus-1 dan bus-3



Gambar 8 Grafik V = f (t) pada bus-2, bus-4 dan bus-5

H. Perbandingan Stabilitas Sudut Rotor, Frekuensi dan Tegangan

TABEL V  
PERBANDINGAN STABILITAS SUDUT ROTOR

Generator	Sebelum Interkoneksi		Sesudah Interkoneksi	
	$\delta$ (derajat)	$t_{\text{pemulihan}}$ (s)	$\delta$ (derajat)	$t_{\text{pemulihan}}$ (s)
Gen-1	84,16	5,504	124,8	5,004

TABEL VI  
PERBANDINGAN FREKUENSI

Generator	Sebelum Interkoneksi		Sesudah Interkoneksi	
	f (Hz)	$t_{\text{pemulihan}}$ (dtk)	f (Hz)	$t_{\text{pemulihan}}$ (dtk)
Gen-1	50,14	5,879	50,22	4,125

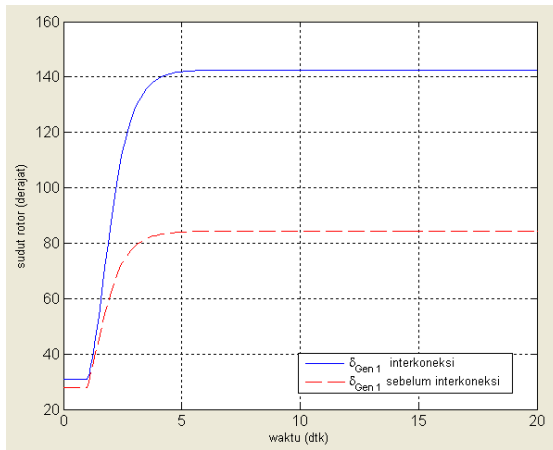
Berdasarkan analisis stabilitas sistem daya di GI Turen pada kondisi sebelum interkoneksi dan sesudah interkoneksi, maka dapat diperoleh gambaran umum tentang stabilitas sistem daya di Gardu Induk Turen seperti pada Tabel V, Tabel VI dan Tabel VII.

Grafik perbandingan stabilitas sudut rotor pada

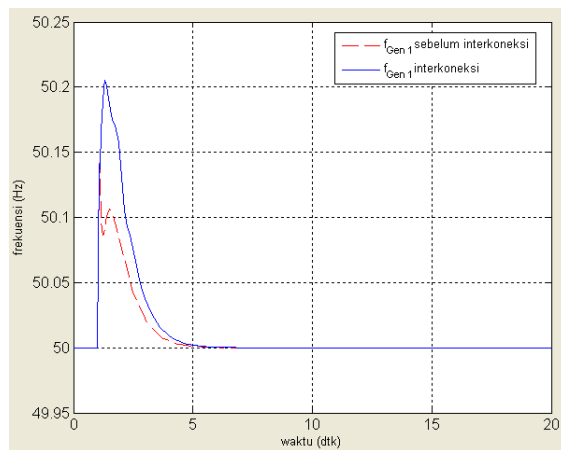
generator ditunjukkan dalam Gambar 9, dimana pada grafik tersebut dapat dilihat perubahan sudut rotor generator sebelum dan sesudah interkoneksi serta perbedaan waktu yang diperlukan generator untuk dapat beroperasi pada kondisi sinkronnya setelah terjadi gangguan. Perbandingan stabilitas frekuensi pada generator ditunjukkan pada Gambar 10, perubahan frekuensi generator sebelum dan sesudah interkoneksi serta perbedaan waktu yang diperlukan generator untuk dapat kembali pada frekuensi normal setelah terjadi gangguan.

TABEL VII  
PERBANDINGAN STABILITAS TEGANGAN

Bus	Sebelum Interkoneksi		Sesudah Interkoneksi	
	V (p.u)	t <sub>drop</sub> (dtk)	V (p.u)	t <sub>drop</sub> (dtk)
Bus-1	0,0409	100	0,0352	100
Bus-2	0,0035	100	0,0037	100
Bus-3	0,0014	100	0,0018	100
Bus-4	0,0026	100	0,0047	100



Gambar 9 Grafik sudut rotor = f(t) generator Gen-1



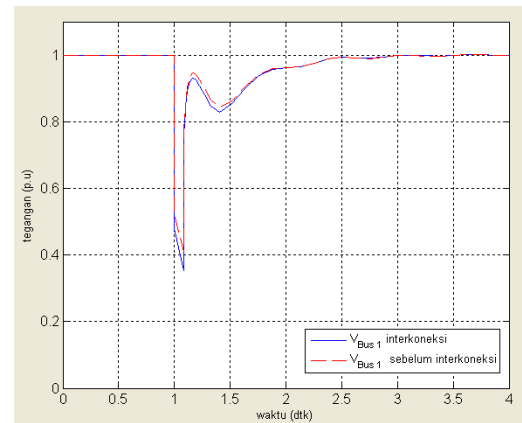
Gambar 10 Grafik frekuensi = f(t) generator Gen-1

Grafik perbandingan tegangan pada bus-bus GI Turen, yang menunjukkan perbedaan tegangan pada kondisi sebelum interkoneksi dan sesudah interkoneksi dapat dilihat dalam Gambar 11-12.

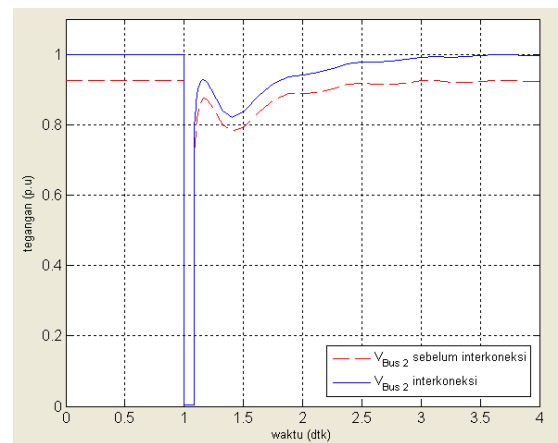
VI. KESIMPULAN

Dari hasil analisis yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- a) Interkoneksi PLTM Ampelgading di Gardu Induk Turen memberikan perbaikan pada profil tegangan bus GI dari 0,924 p.u menjadi 0,999 p.u atau naik sebesar 8,11%.
- b) Pada saat terjadi gangguan, sistem daya di GI Turen berada dalam kondisi stabil, dimana setelah mengalami gangguan, tegangan, sudut rotor dan frekuensi generator dapat kembali pada operasi normalnya.
- c) *TG (Turbine Governor)* memiliki pengaruh terhadap waktu pemulihan sudut rotor dan frekuensi generator yang lebih cepat dibandingkan dengan *AVR*, yaitu 4,004 detik.
- d) Waktu pemutusan kritis dari generator Gen-1 adalah 0,290 detik sedangkan pada generator Gen-2 waktu pemutusan kritisnya adalah 0,120 detik.



Gambar 11 Grafik tegangan = f(t) pada bus-1



Gambar 12 Grafik tegangan = f(t) pada bus-2

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Reza, P. H. Schavemaker dan W. L. Kling, 2009, Investigating Impacts of Distributed Generation on Transmission System Stability, 2003 IEEE, Bologna PowerTech Proceedings, ISBN 0-7803-7968-3
- [2] S. El Safty, B. M. Abd El Geliel and C. M. Ammar, 2010, Distributed Generation Stability During Fault Conditions, European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ) International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10) Granada (Spain), 23-25 March, 2010
- [3] Azmy, A.M.; Erlich, I.; 2005, Impact of distributed generation on the stability of electrical power system, IEEE Power

Engineering Society General Meeting, Page(s): 1056 - 1063  
Vol. 2

- [4] Zhu, D.; Broadwater, R.P.; Kwa-Sur Tam; Seguin, R.; Asgeirsson, H.; 2006, Impact of DG Placement on Reliability and Efficiency with Time-Varying Loads, IEEE Transactions on Power Systems, Volume: 21 , Issue: 1, Page(s): 419- 427
- [5] Grigsby, Leonard L. 2007. Power System Stability and Control. New York : Taylor & Francis Group, LLC.
- [6] IEEE-CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions (Kundur, P., Paserba, J., Ajarapu, V.,Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., and Vittal, V.). 2004. Definition and Classification of Power System Stability. IEEE Transactions on Power Systems.