

Analisis *Steady State* dan Dinamik pada Perencanaan Pengembangan Pembangkit Sistem Gorontalo

Frengki Eka Putra Surosa

Kiki.alaska@gmail.com
Teknik Elektoro, Universitas
Brawijaya, Malang, Indonesia

Hadi Suyono

Hadis@ub.ac.id
Teknik Elektro, Universitas
Brawijaya, Malang, Indonesia

Wijono

Wijono@ub.ac.id
Teknik Elektro, Universitas
Brawijaya, Malang, Indonesia

Abstrak

Meningkatnya konsumen energi listrik di Gorontalo akan meningkatkan kebutuhan pasokannya. Peningkatan tersebut memerlukan penambahan sumber-sumber pembangkit baru. Untuk memenuhi hal tersebut, saat ini tengah dibangun sebuah pembangkit baru, yaitu PLTU Anggrek, dengan kapasitas 2x25 MW. Injeksi PLTU Anggrek ini akan secara langsung mempengaruhi aliran daya, dan stabilitas dinamik sistem yang meliputi stabilitas sudut rotor (*rotor angle stability*), stabilitas frekuensi (*frekuensi stability*), dan stabilitas tegangan (*voltage stability*). Waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) juga dianalisis untuk mengevaluasi *performance* sistem. Hasil analisis *steady state* menunjukkan bahwa profil tegangan pada sistem setelah injeksi terjadi perbaikan dengan nilai rata-rata sebesar 4,61 %. Hasil analisis stabilitas dinamik menunjukkan bahwa waktu pemulihan dari sudut rotor, frekuensi dan tegangan menjadi lebih cepat.

Kata Kunci — aliran daya, injeksi daya, PLTU Anggrek, stabilitas frekuensi, stabilitas sudut rotor, stabilitas tegangan.

Abstract

The increasing consumption of electrical energy in Gorontalo will increase its supply needs. The improvements require the addition of new generation sources. Currently it is built a new power plant, namely PLTU Anggrek, with a capacity of 2x25 MW to fulfill the energy demand. The injection of PLTU Anggrek will directly affect the power flow and dynamic stability of the system including the rotor angle stability, frekuensi stability, and voltage stability. Critical clearing time were also analyzed to evaluate system performance. The steady state analysis Results show that the voltage profile on the system after injection increase with an average value of 4.61%. Dynamic stability analysis results show that the recovery time of rotor angle, frequency and voltage becomes shorter.

Keywords — *frequency stability, PLTU Anggrek, power flow, power injection, rotor angle stability, voltage stability.*

I. PENDAHULUAN

Perencanaan dan analisis sistem tenaga listrik perlu selalu dilakukan secara berkala untuk melakukan evaluasi terhadap perubahan sistem yang ada. Sistem daya secara umum terdapat empat komponen utama yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi, sistem distribusi, dan beban. Dengan adanya

peningkatan konsumen energi listrik, maka secara langsung akan mempengaruhi peningkatan pasokan energi listrik. Karena itu, perencanaan pengembangan suatu sistem tenaga listrik adalah perlu dilakukan karena melibatkan masalah bagaimana merencanakan ketersediaan pembangkitan, saluran transmisi dan distribusi sesuai dengan kebutuhan energi di masa yang akan datang. Pembangkit yang akan dibangun harus ditentukan jenis dan tempatnya dengan memenuhi syarat ekonomi dan teknis [1].

Kebutuhan tenaga listrik yang semakin meningkat dari waktu ke waktu ini, diperlukan adanya upaya pengembangan sistem pembangkitan guna menjaga energi listrik sesuai kebutuhan masyarakat [2]. Untuk mengatasi krisis energi di Gorontalo, saat ini tengah dibangun PLTU Anggrek berbahan bakar batubara dengan kapasitas 2x25 MW. PLTU ini akan diinjeksikan pada sistem Gorontalo melalui saluran transmisi 150 kV yang terinterkoneksi dengan sistem Minahasa.

Injeksi daya baru pada sistem Gorontalo ini akan menyebabkan terjadinya perubahan aliran daya pada sistem, dan akan mempengaruhi kestabilan sistem secara keseluruhan. Evaluasi dan analisis dampak injeksi pembangkit baru ini terhadap sistem kelistrikan yang ada perlu dilakukan untuk mendapatkan strategi terbaik untuk mempertahankan sistem untuk tetap beroperasi pada saat terjadinya gangguan. Disamping itu, analisis juga diperlukan untuk *updating* data yang berguna dalam operasi sistem maupun sebagai bahan perancangan pengembangan sistem kelistrikan di masa yang akan datang.

Oleh karena itu, analisis terhadap sistem perlu dilakukan khususnya untuk mengetahui pengaruh yang timbul pada sistem kelistrikan. Analisis aliran daya diperlukan untuk menentukan lokasi injeksi terbaik untuk memperbaiki profil tegangan, sehingga berdampak kepada penurunan rugi-rugi daya listrik yang mungkin terjadi pada sistem. Disamping analisis *steady state*, analisis dinamik berupa stabilitas tegangan, stabilitas frekuensi, dan sudut rotor sebelum dan sesudah injeksi daya baru perlu dilakukan untuk mengetahui performansi sistem pada saat terjadi gangguan.



II. STABILITAS SISTEM DAYA

Stabilitas dari suatu sistem secara fisis mengacu pada kemampuan sistem tersebut untuk kembali ke posisi keseimbangan awal pada saat terjadi gangguan atau menuju titik keseimbangan baru yang secara umum mendekati titik keseimbangan yang lama. Gangguan yang terjadi dapat berupa gangguan kecil atau gangguan besar yang bisa membuat sistem tidak stabil [3]. Karakterisasi sistem daya pada saat *steady state* sebelum terjadi gangguan akan sangat menentukan perilaku dinamis suatu sistem daya. Stimulasi gangguan pada sistem daya yang akan menyebabkan osilasi secara transien ataupun permanen akan berimplikasi kepada sistem secara keseluruhan. Karena itu, analisis dinamis sistem dapat membantu dalam memberikan gambaran ketangguhan suatu sistem untuk kembali kepada keadaan normal setelah terjadi gangguan, yang selanjutnya derajat kestabilan suatu sistem daya dapat ditentukan [4]. Analisis injeksi pembangkit pada sistem daya juga telah banyak menjadi perhatian peneliti termasuk juga injeksi pada sistem distribusi berupa pembangkit tersebar dengan menggunakan injeksi *renewable energy* [5-8]. Dampak dari injeksi pembangkit tersebar dalam stabilitas transmisi, tidak begitu terasa pada konsentrasi daya yang rendah. Namun pada penetrasi yang besar, dampaknya tidak terbatas pada jaringan distribusi tetapi mulai mempengaruhi seluruh sistem termasuk sistem transmisi. Tingkat penetrasi pembangkit tersebar ini berpengaruh kepada sistem stabilitas pada sistem transmisi [9].

III. ANALISIS STEADY STATE

Analisis aliran daya adalah suatu analisis yang digunakan untuk menentukan tegangan, arus, daya aktif dan daya reaktif diberbagai macam titik dalam suatu jaringan listrik pada keadaan operasi normal. Selain dipergunakan untuk perencanaan pengembangan sistem listrik dimasa mendatang, juga dapat digunakan untuk mengevaluasi kondisi sistem kelistrikan yang sudah ada [1]. Setiap bus terdapat empat parameter yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), magnitud tegangan (V) dan sudut tegangan (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)

Injeksi arus pada suatu bus p dapat dirumuskan dengan:

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} \cdot V_q \dots\dots\dots(2)$$

Dengan: I_p : arus pada bus p , V_q : tegangan pada bus q , Y_{pq} : impedansi antara bus p dan bus q , dan $p = 1 \dots n$.

Daya aktif dan daya reaktif pada bus i adalah

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

atau

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

Dimana:

- 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 *Full Newton-Raphson* digunakan. Metode ini menerapkan modifikasi 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:

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

atau

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

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

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

IV. ANALISIS DINAMIK SISTEM DAYA

A. Stabilitas Sudut Rotor

Dalam sebuah mesin sinkron, penerak utama memberikan sebuah torsi mekanis (T_m) pada poros mesin dan mesin menghasilkan suatu torsi elektromagnetik (T_e). Pada saat terjadi gangguan, torsi mekanis lebih besar dari torsi elektromagnetik, dan menghasilkan torsi percepatan (T_a) sebagai berikut:

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

dimana

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

Untuk 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 listrik generator akan jauh melampaui daya masuk mekanis. 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. Waktu pemutusan kritis

terjadi penurunan pada lokasi gangguan yang dekat dengan generator utama [3].

B. Stabilitas Frekuensi

Stabilitas frekuensi berkaitan dengan kemampuan sistem daya untuk mempertahankan kestabilan frekuensi dalam kisaran nominal [10]. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk mengembalikan keseimbangan antara sistem generator dan beban, dengan rugi-rugi nominal pada beban. 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.

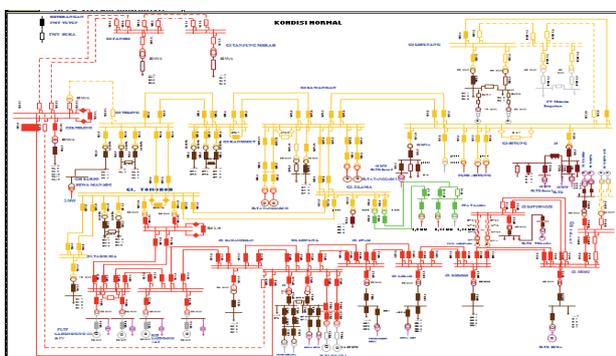
C. Stabilitas Tegangan

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" [11]. 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 *drop* tegangan yang tidak dapat dikendalikan.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

D. Data Sistem

Sistem kelistrikan Sulawesi bagian Utara (SULBAGUT) meliputi area sistem kelistrikan Minahasa, Bolaang Mongondow, dan Gorontalo yang saling terinterkoneksi melalui jaringan transmisi 70 kV dan 150 kV. Sistem Minahasa terdiri dari 11 Gardu Induk (GI), sistem Bolaang Mongondow terdiri dari 2 GI dan sistem Gorontalo terdiri dari 4 GI. Jumlah bus sistem SULBAGUT keseluruhannya adalah 68 bus, dengan jumlah pembangkit sebanyak 35 unit dengan daya maksimum pembangkitan sebesar 271,66 MW, dan pembebanan maksimum adalah sebesar 268,05 MW. Jaringan satu garis sistem SULBAGUT ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Single Line Sistem SULBAGUT

E. Simulasi Aliran Daya Sebelum Injeksi

Hasil analisis aliran daya sebelum injeksi daya PLTU Anggrek pada beban maksimum, diperoleh tegangan masih dalam batas toleransi yaitu +5% dan -10% dari rating tegangan. Tegangan pada GI Botupingge sebesar 0,91 pu, GI Isimu sebesar 0,92 pu, GI Marisa sebesar 0,93 pu, dan GI Buroko sebesar 0,94 pu. Rugi-rugi daya (*power losses*) sebelum injeksi daya PLTU Anggrek pada pembebanan maksimum adalah sebesar 3,612 MW untuk rugi daya aktif dan 25,939 MVAR untuk daya reaktif. Tegangan dan rugi daya ini, akan dijadikan sebagai acuan untuk menentukan titik injeksi terbaik untuk evakuasi pembangkit daya PLTU Anggrek berdasarkan tinjauan geografis dan aspek ekonomis sebagai bahan pertimbangan.

Lokasi pembangunan PLTU Anggrek adalah di desa Ilangata, Kecamatan Anggrek, Kabupaten Gorontalo Utara, Provinsi Gorontalo. Lokasi tersebut berada di atas pegunungan Gorontalo, dan transportasi lebih dekat dengan pulau Kalimantan sebagai penghasil batubara. Panjang saluran transmisi antara lokasi pembangunan PLTU Anggrek dengan GI yang ada pada sistem Gorontalo merupakan salah satu faktor untuk menentukan titik injeksi terbaik. Panjang saluran transmisi dihitung dengan menggunakan *mapping google earth*. Panjang saluran transmisi dari lokasi pembangunan PLTU Anggrek ke GI Botupingge adalah 51,70 km, ke GI Isimu 23,54 km, ke GI Buroko 55,60 km, dan ke GI Marisa 96,57 km. Setelah mengetahui parameter dari saluran transmisi tersebut, dilakukan skenario simulasi *load flow* untuk menentukan dimana lokasi titik injeksi terbaik.

Ada 4 (empat) skenario simulasi *load flow* dilakukan untuk menentukan titik injeksi terbaik dari PLTU Anggrek pada sistem Gorontalo yaitu: Skenario 1 - diinjeksikan pada GI Botupingge, dengan rata-rata kenaikan profil tegangan sebesar 3,17 %, selisih pengurangan rugi-rugi daya (*losses*) daya aktif 0,06 % dan daya reaktif 3,09 %. Skenario 2 - diinjeksikan pada GI Isimu, dengan rata-rata kenaikan profil tegangan sebesar 4,61 %, pengurangan *losses* daya aktif 0,21 % dan daya reaktif 3,91 %. Skenario 3 - diinjeksikan pada GI Buroko, dengan rata-rata kenaikan profil tegangan sebesar 1,26 %, selisih rugi-rugi daya (*losses*) daya aktif mengalami kenaikan 0,31 % dan pengurangan *losses* daya reaktif 1,08 %, dan Skenario 4 - diinjeksikan pada GI Marisa, dengan rata-rata kenaikan profil tegangan sebesar 0,47 % dan selisih rugi-rugi daya (*losses*) daya aktif mengalami kenaikan 0,64 % dan daya reaktif 0,45 %. Hasil analisis *load flow*, yaitu profil tegangan dan rugi-rugi daya untuk empat skenario, pada beberapa GI penting, diberikan pada Tabel I.

TABEL I

SKENARIO HASIL LOAD FLOW SEBELUM INJEKSI DAN SESUDAH INJEKSI

Nama GI	Eksisting	Tegangan (pu) – pada Skenario-			
		1	2	3	4
Botupingge	0,9107	0,9625	0,9603	0,9194	0,9062
Isimu	0,9229	0,9542	0,9781	0,9341	0,9198
Buroko	0,9375	0,9604	0,9776	0,9627	0,9355
Marisa	0,9266	0,9477	0,9663	0,9320	0,9553
Penting lainnya	0,9546	0,9682	0,9783	0,9695	0,9536
Losses P (MW)	3,612	3,456	3,047	4,458	5,399
Losses Q (MVAR)	25,939	19,309	17,635	23,577	26,945
% Losses P	1,33	1,27	1,12	1,64	1,97
% Losses Q	13,50	10,41	9,59	12,42	13,95

Hasil analisis dari empat skenario terlihat di atas, bahwa perbaikan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya terbaik adalah pada Skenario 2, sehingga skenario 2 dipilih sebagai lokasi untuk titik injeksi terbaik daya PLTU Anggrek. Letak geografis GI Isimu berada dekat dengan lokasi pembangunan PLTU Anggrek, yaitu berada dipinggiran pusat kota dan secara langsung terhubung dengan GI Botupingge, GI Marisa dan GI Buroko. Dari segi jarak saluran secara geografis, injeksi PLTU Anggrek ke GI Isimu memberikan jarak yang terpendek yaitu 23,54 km, sehingga drop tegangan yang disebabkan oleh rugi-rugi saluran injeksi memberikan dampak yang terkecil dibandingkan dengan lokasi injeksi lainnya.

F. Simulasi Aliran Daya Sesudah Injeksi

Injeksi PLTU Anggrek di bus GI Isimu, akan berpengaruh kepada terjadinya perbaikan pada profil tegangan pada sistem Gorontalo dengan kenaikan rata-rata sebesar 4,61% dibandingkan dengan sebelum injeksi. Untuk hasil simulasi aliran daya pada saluran, sebelum injeksi daya PLTU Anggrek pada pembebanan maksimum, menunjukkan bahwa aliran daya sistem SULBAGUT yang terbesar ada pada saluran dari GI Lahendong I, II ke GI Kawangkoan sebesar 17,5 MW, sesudah injeksi turun menjadi 10,6 MW. Sedangkan untuk perbandingan total losses ditunjukkan pada Tabel II, dimana rugi daya aktif sebesar 1,33% dan rugi daya reaktif adalah 13,05% untuk kondisi sebelum injeksi, sedangkan rugi daya sesudah injeksi adalah sebesar 1,12% untuk rugi daya aktif dan 9,59% untuk rugi daya reaktif.

TABEL II

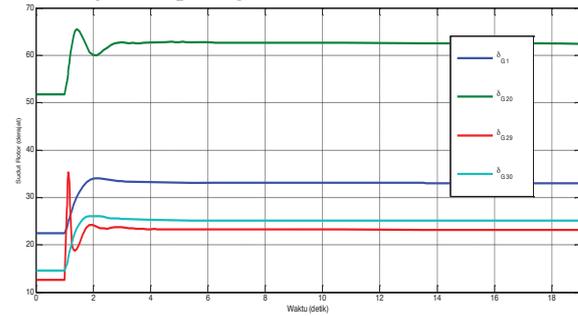
TOTAL LOSSES SEBELUM DAN SESUDAH INJEKSI

Total Losses	SEBELUM	SESUDAH
Daya Aktif (MW)	1,33 %	1,12 %
Daya Reaktif (MVAR)	13.50 %	9,59 %

G. Stabilitas Sudut Rotor Sebelum Injeksi

Hasil stabilitas sudut rotor sistem kelistrikan SULBAGUT sebelum injeksi daya PLTU Anggrek ditunjukkan pada Gambar 2. Respon sudut rotor yang ditampilkan adalah sebagian generator yang ada dari sistem SULBAGUT dengan jenis pembangkit yang berbeda-beda sehingga respon tipikal dari sudut rotor untuk masing-masing pembangkit berbeda tersebut dapat diwakili. Respon stabilitas sudut rotor pada sebelum,

saat, dan sesudah terjadi gangguan untuk generator 1, 20, 29, dan 30 ditunjukkan pada gambar 2.



Gbr. 2 Grafik sudut rotor pada generator 1, 20, 29 dan 30 sebelum injeksi

Dari Gambar 2 hasil simulasi grafik sudut rotor fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel III. Pada tabel ditunjukkan osilasi transien sudut maksimum dan minimum yang terjadi, dan nilai sudut *equilibrium steady-state*. Sudut rotor mengalami osilasi transien dan dapat kembali stabil dengan sudut yang baru, dengan waktu pemulihan adalah G1 15,1 detik, G20 17,9 detik, G29 13,1 detik, dan G30 14,9 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

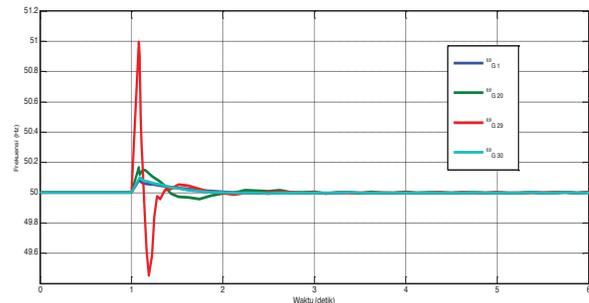
TABEL III

STABILITAS SUDUT ROTOR SEBELUM INJEKSI

Generator	Ayunan	Awal (derajat)	Selama gangguan (derajat)	Baru (derajat)	Steady State (detik)
G1	maks	22,4	34	33	15,1
	min		33		
G20	maks	51,8	65,5	62,4	17,9
	min		60		
G29	maks	12,7	35,1	23,1	13,1
	min		18,9		
G30	maks	14,5	26,1	25,1	14,9
	min		25,1		

H. Stabilitas Frekuensi Sebelum Injeksi

Hasil simulasi stabilitas frekuensi sebelum injeksi daya PLTU Anggrek ditunjukkan pada Gambar 3. Sebelum terjadi gangguan frekuensi generator 1, 20, 29, dan 30 berada pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz, hingga terjadi gangguan pada detik 1.



Gbr. 3 Grafik frekuensi pada generator 1, 20, 29 dan 30 sebelum injeksi

Dari Gambar 3 hasil simulasi grafik frekuensi fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel IV dimana saat sistem mengalami gangguan, frekuensi mengalami osilasi dan dapat kembali stabil pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz, dengan waktu pemulihan adalah

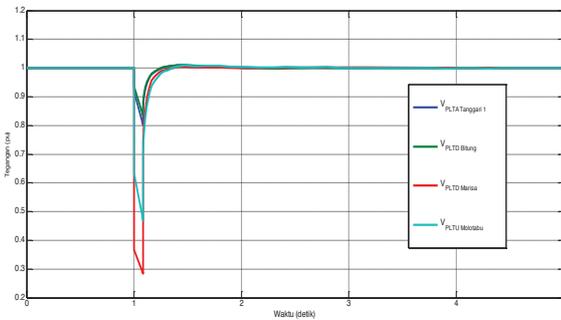
G1 selama 8,1 detik, G20 selama 14,8 detik, G29 selama 4 detik, dan G30 selama 6,7 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

TABEL IV
STABILITAS FREKUENSI SEBELUM INJEKSI

Generator	Ayunan	Saat Gangguan (Hz)	Steady State (Hz)	Steady State (detik)
G1	maks	50,088	50	8,1
	min	49,99		
G20	maks	50,16	50	14,8
	min	49,95		
G29	maks	51	50	4
	min	49,45		
G30	maks	50,1	50	6,7
	min	49,99		

I. Stabilitas Tegangan Sebelum Injeksi

Stabilitas tegangan sebelum injeksi daya PLTU Anggrek ditunjukkan pada Gambar 4. Keempat bus generator ini sebelum terjadi gangguan semuanya bekerja pada tegangan 1 pu, hingga terjadi gangguan pada detik 1.



Gbr. 4 Grafik tegangan pada generator 1, 20, 29 dan 30 sebelum injeksi

Pada Gambar 4 hasil simulasi grafik tegangan fungsi waktu dapat dituangkan pada Tabel V 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 G1 selama 6,3 detik, G20 selama 8,3 detik, G29 selama 4,9 detik, dan G30 selama 3,1 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

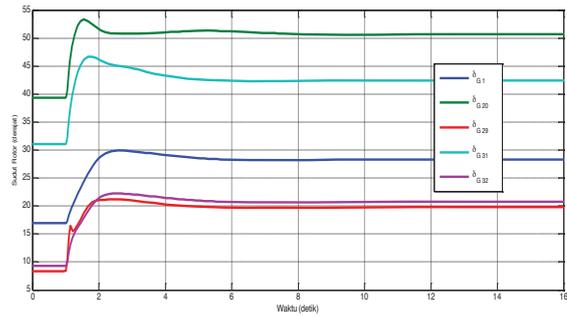
TABEL V
STABILITAS TEGANGAN SEBELUM INJEKSI

Bus	V drop	V Steady State	t Steady State
Generator	(pu)	(pu)	(detik)
G 1	0,83	1	6,3
G 20	0,47	1	8,3
G 29	0,29	1	4,9
G 30	0,8	1	3,1

J. Stabilitas Sudut Rotor Sesudah Injeksi

Stabilitas sudut rotor sesudah injeksi daya PLTU Anggrek, yang dibahas adalah stabilitas sudut rotor

pada generator 1, 20, 29, 31, dan 32, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.



Gbr. 5 Grafik sudut rotor pada generator 1, 20, 29, 31 dan 32 sesudah injeksi

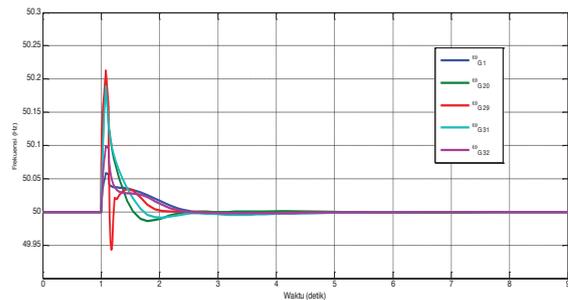
TABEL VI
STABILITAS SUDUT ROTOR SESUDAH INJEKSI

Generator	Ayunan	Awal (derajat)	Saat gangguan (derajat)	Baru (derajat)	Steady State (detik)
G1	maks	16,9	29,9	28,2	14
	min		28,2		
G20	maks	39,3	53,2	50,8	12,9
	min		50,8		
G29	maks	8,3	21,1	19,8	9,7
	min		19,8		
G31	maks	30,08	46,8	42,3	9,4
	min		42,3		
G32	maks	9,3	22,2	20,8	14,5
	min		20,8		

Pada 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 14 detik, G20 selama 12,9 detik, G29 selama 9,7 detik, G31 selama 9,4 detik dan G32 selama 14,5 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

K. Stabilitas Frekuensi Sesudah Injeksi

Hasil simulasi stabilitas frekuensi sesudah injeksi daya PLTU Anggrek ditunjukkan pada Gambar 6 untuk generator 1, 20, 29, 31 dan 32.



Gbr. 6 Grafik frekuensi pada generator 1, 20, 29, 31 dan 32 sesudah injeksi

Dari Gambar 6 hasil simulasi grafik frekuensi fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel VII. Hasil simulasi stabilitas frekuensi sesudah injeksi daya PLTU Anggrek ditunjukkan pada Gambar 6 untuk generator 1, 20, 29, 31 dan 32.

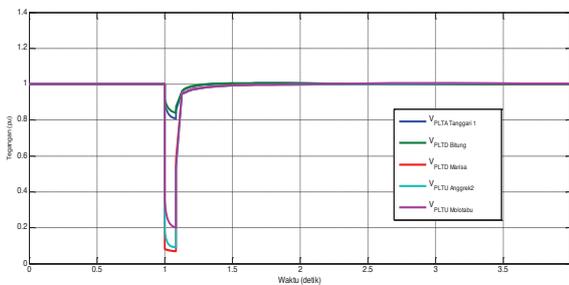
TABEL VII
STABILITAS FREKUENSI SESUDAH INJEKSI

Generator	Ayunan	Saat gangguan	Steady State	Steady State
		(Hz)	(Hz)	(detik)
G1	maks	50,06	50	6,9
	min	49,99		
G20	maks	50,20	50	5,1
	min	49,95		
G29	maks	50,21	50	2,5
	min	49,94		
G31	maks	50,18	50	6,4
	min	49,98		
G32	maks	50,11	50	6,4
	min	49,99		

Frekuensi mengalami osilasi dan dapat kembali stabil pada frekuensi kerja yaitu 50 Hz, dengan waktu pemulihan untuk G1 selama 6,9 detik, G20 selama 5,1 detik, G29 selama 2,5 detik, G31 selama 6,4 detik, dan G32 selama 6,4 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

L. Stabilitas Tegangan Sesudah Injeksi

Hasil simulasi stabilitas tegangan sesudah injeksi daya PLTU Anggrek ditunjukkan pada Gambar 7 untuk bus G1, 20, 29, 31 dan 32.



Gbr. 7 Grafik tegangan pada generator 1, 20, 29, 31 dan 32 sesudah injeksi

Hasil simulasi grafik tegangan fungsi waktu dapat dituangkan dalam bentuk tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel VIII yang mana saat sistem mengalami gangguan pada detik 1, tegangan mengalami drop dan dapat kembali stabil pada tegangan kerja 1 pu. Untuk bus G1 selama 2,9 detik, G20 selama 1,7 detik, G29 selama 2 detik, G31 selama 2,1 detik dan G32 selama 3,1 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

TABEL VIII
STABILITAS TEGANGAN SESUDAH INJEKSI

Bus	V Drop	V Steady State	t Steady State
Generator	(pu)	(pu)	(pu)
G 1	0,83	1	2,9
G 20	0,2	1	1,7
G 29	0,1	1	2
G 31	0,1	1	2,1
G 32	0,81	1	3,1

VI. KESIMPULAN (PENUTUP)

Pengaruh injeksi pembangkit baru PLTU Anggrek (2x25MW) pada sistem kelistrikan SULBAGUT baik dari aspek steady-state dan dinamik dibahas pada makalah ini. Pemilihan lokasi injeksi terbaik dengan memperhatikan

perbaikan profil tegangan dan rugi-rugi daya sistem telah ditentukan pada penelitian ini. Beberapa poin penting dari hasil penelitian didapatkan sebagai berikut:

1. Injeksi daya terbaik dari PLTU Anggrek (2x25MW) adalah ke bus GI Isimu, selain menambah kekurangan daya pada sistem, sekaligus juga dapat memperbaiki profil tegangan pada GI sistem Gorontalo, dimana rata-rata kenaikan profil tegangannya adalah sebesar 4,61% untuk pembebanan maksimum dibandingkan dengan sebelum injeksi.
2. Injeksi daya PLTU Anggrek, telah memperbaiki rugi-rugi daya sistem (*power losses*) dimana rugi daya aktif adalah sebesar 1.33% dan rugi daya reaktif adalah sebesar 13.50% pada kondisi sebelum injeksi, sedangkan pada kondisi sesudah injeksi rugi daya aktif turun menjadi 1.12% dan rugi daya reaktif 9.59%.
3. Berdasarkan analisis stabilitas dinamik, yaitu stabilitas sudut rotor, stabilitas tegangan, dan stabilitas frekuensi, pada saat terjadi gangguan pada sistem dengan durasi waktu 150ms, sistem daya di SULBAGUT akan kembali pada kondisi stabil, setelah terjadi osilasi secara transien pada saat gangguan, namun setelah hilangnya gangguan, sistem kembali kepada keadaan normal.

REFERENSI

- [1] Grainger, J. J. and W.D. Stevenson, Jr. 1994. *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc., USA
- [2] PLN, Rencanan Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2011-2020. Surat Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Nomor 2026.K/20/MEM/2010.
- [3] Kundur, P.; Paserba, J.; Ajarapu, V.; Andersson, G.; Bose, A.; Canizares, C.; Hatziargyriou, N.; Hill, D.; Stankovic, A.; Taylor, C.; Van Cutsem, T.; Vittal, V.; Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions, IEEE Transactions on Power Systems, 2004, Volume: 19, Issue: 3, Pages: 1387 - 1401
- [4] Suyono, H.; Nor, K.M.; Yusof, S., Transient Stability Program Using Component-Based Software Engineering, 2005, IEEE Conference Publications TENCON 2005 IEEE Region 10, Pages: 1 - 6, DOI: 10.1109/TENCON.2005.301011
- [5] Suyono, H. and Zainuddin, M., Injection Impact of Photovoltaic Distributed Generations (PVDG) on Power Distribution System Stability, 2015, Applied Mechanics and Materials International Journal, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol. 785 (2015) pp 403-408 doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.785.231
- [6] J.R. Aguero, and S.J. Steffel, Integration Challenges of Photovoltaic Distributed Generation on Power Distribution Systems, *IEEE Power and Energy Society*, Page(s) 1-6, San Diego, CA (2011).
- [7] F. Katiraei, and J.R. Aguero, Solar PV Integration Challenges, *IEEE Power & energy magazine*, Vol. 9, Iss. 3, Page(s): 62-71, (2011).
- [8] Suyono, H., Santoso, H., dan Purnomo, MFE., Analysis of Minihydro Power and Photovoltaic Injection into the Grid System, 2013, Proceedings of the National Olimpiad and International Conference on Education, Technology and Science (NETS) 2013
- [9] Reza M, Sloomwe JG, Schvemaker PH, Kling WL, Vander Sluis, 2003., *Investigation Impact of Distribution Generation on Transmission System Stability*, IEEE, Bologna Power Tech Proceedings, ISBN 0-7803-7967-3.
- [10] Grigsby, Leonard L. 2007. *Power System Stability and Control*. New York: Taylor and Francis Group, LLC.
- [11] Kundur, P. 1994. *Power System Stability and Design*, McGraw-Hill, Inc., USA.