

Analisis *Load Flow* dan *Transient Stability* Sistem Kelistrikan Gorontalo 150 kV Pasca Interkoneksi PLTS Isimu 10 MWp

Load Flow and Transient Stability Analysis of the Gorontalo 150 kV Electrical System Post-Interconnection of the 10 MWp Isimu Solar Power Plant

Frengki Eka Putra Surusa
Prodi Teknik Elektro
Universitas Ichsan Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
kiki.alaska@gmail.com

Ihksan
Prodi Teknik Elektro
Universitas Ichsan Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
ihksan@gmail.com

Steven Humena
Prodi Teknik Elektro
Universitas Ichsan Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
steven.humena@unisan.ac.id

Sardi Salim
Prodi Teknik Elektro
Universitas Negeri Gorontalo
Gorontalo, Indonesia
sardi@ung.ac.id

Diterima : Januari 2026
Disetujui : Juni 2026
Dipublikasi : Juli 2026

Abstrak— Saat ini telah dibangun pembangkit listrik tenaga surya PLTS Isimu pada sistem kelistrikan Gorontalo. PLTS ini akan di interkonesikan pada bus GI Isimu secara langsung melalui saluran distribusi 20 kV. Dengan adanya interkoneksi PLTS ini sistem akan mengalami perubahan aliran daya dari sebelumnya, disamping itu juga akan berdampak pada kestabilan sistem. Untuk itu, analisis sistem yang harus dilakukan adalah analisis kinerja sistem pembangkit utama saat kondisi keadaan tunak akibat gangguan pada sistem sebelum dan sesudah adanya interkoneksi PLTS masuk ke sistem distribusi 20 kV GI Isimu. Setelah interkoneksi PLTS Isimu ini memberikan perbaikan profil tegangan pada setiap bus Gardu Induk dengan rata-rata kenaikan 1.06%, dan dapat memberikan rugi-rugi daya sangat kecil yaitu sebesar 0.43%, Sehingga memberikan performance sistem lebih baik. Pada saat terjadi gangguan dengan durasi waktu singkat, sistem tenaga listrik di Gorontalo berada dalam kondisi stabil, dimana setelah mengalami gangguan sudut rotor generator dapat kembali pada operasi normalnya dengan waktu lebih cepat 1 detik dari sebelumnya.

Kata Kunci—PLTS Isimu; Aliran Daya; Stabilitas Sudut Rotor.

Abstract— *The Isimu Solar Power Plant (PLTS) has been constructed for the Gorontalo power system. This plant is directly interconnected to the Isimu Substation bus via a 20 kV distribution line. This interconnection alters the system's power flow and impacts its stability. Consequently, an analysis of the main generation system's performance under steady-state conditions—considering system disturbances—was conducted for both pre- and post-interconnection scenarios. The Isimu PLTS interconnection improved the voltage profile at each substation bus by an average of 1.06% and resulted in minimal power losses of 0.43%, thereby enhancing overall system performance. During short-duration disturbances, the Gorontalo power system remained stable; following a disturbance, the generator rotor angle returned to normal operation one second faster than in the pre-interconnection state.*

Keywords—Isimu PLTS; Power Flow; Rotor Angle Stability.

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik di Gorontalo meliputi satu kesatuan dengan Minahasa dan sistem Kotamobagu yang dinamai dengan sistem interkoneksi Sulawesi Bagian Utara (Sulbagut). Gorontalo mempunyai tujuh Gardu Induk (GI) yaitu GI Buroko, GI Isimu, GI Anggrek, GI Botupingge, GI Marisa, GI Tilamuta dan GI Gorontalo Baru yang saling terhubung dengan sistem transmisi 150 kV.

Sistem pembangkitan di Gorontalo terdiri dari berbagai jenis pembangkit utama yaitu: Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), PLTU Anggrek. Ke tiga pembangkit ini terhubung secara langsung ke sistem interkoneksi 150 kV Sulbagut. Sedangkan pembangkit terdistribusi adalah Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Taludaa, PLTMH Mongango, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD). Pembangkit yang berada di Gorontalo tidak hanya menyuplai daya untuk wilayah Gorontalo saja tetapi juga menyuplai kebutuhan daya untuk wilayah Bolaangmongondow Selatan dan Bolaangmongondow Utara. Total keseluruhan daya yang terpasang pada pembangkit yaitu sebesar 207 MW.

Saat ini suplay daya listrik dari pembangkit yang beroperasi untuk melayani beban konsumen yaitu sebesar 95,8 MW. Ada beberapa pembangkit yang perlu diadakan pemeliharaan mesin dan faktor sumber energi dari pembangkit yang tersebar seperti PLTMH dan PLTS [1][2]. Sedangkan beban puncak saat ini pada sistem tenaga listrik di Gorontalo sudah mencapai yaitu sebesar 100,64 MW [3]. Sehingga mengalami kekurangan suplay daya dari pembangkit. Untuk mengatasi kekurangan suplay daya tersebut perlu adanya penambahan pembangkit. Oleh karena itu, saat ini tengah dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berskala besar dengan kapasitas daya yaitu sebesar 10 MWp di Kecamatan Isimu Kabupaten Gorontalo.

Perencanaan PLTS ini akan di interkonesikan pada bus GI Isimu secara langsung melalui saluran distribusi 20 kV [4].

Dengan adanya interkoneksi PLTS ini system akan mengalami perubahan aliran daya dari sebelumnya, disamping itu juga akan berdampak pada kestabilan sistem. Interkoneksi PLTS ke jaringan distribusi 20 kV tentunya harus melihat sistem pembangkit utama. Apabila system tidak stabil ketika terjadi gangguan, ketika tidak segera diatasi maka akan menyebabkan adanya pembangkit utama mengalami lepas sinkron dengan sistem akibat sifat intermiten PLTS. Evaluasi terhadap sistem kelistrikan perlu dilakukan agar dapat memperbaharui data sistem, sehingga data yang didapat bisa digunakan untuk pengoperasian sistem dan sebagai perancangan untuk pengembangan sistem kelistrikan kedepannya. Untuk mengetahui pengaruh yang akan terjadi pada system maka system perlu dianalisis.

Untuk itu, analisis sistem yang harus dilakukan adalah analisis kinerja sistem pembangkit utama saat kondisi keadaan tunak akibat gangguan pada sistem sebelum dan sesudah adanya interkoneksi PLTS masuk ke sistem distribusi 20 kV GI Isimu.

Pemanfaatan pembangkit tenaga fotovoltaik pada sistem distribusi telah banyak digunakan di banyak negara. Umumnya, sistem fotovoltaik telah disuntikkan ke sistem distribusi dan disebut sebagai generasi terdistribusi fotovoltaik (PVDG) melalui tingkat tegangan menengah atau rendah. Penyuntikan PVDG pada sistem distribusi telah diklaim memperbaiki profil voltase dan mengurangi kerugian daya. Namun, kinerja sistem distribusi yang baik dalam hal *steady-state point of view*, tidak bisa secara langsung menjamin memberikan respon yang baik selama sistem terganggu. Oleh karena itu, untuk menunjukkan dampak injeksi PVDG pada stabilitas sistem daya yang bersangkutan dalam makalah ini. Ukuran injeksi daya dan lokasi tempat suntikan yang telah ditentukan dengan menggunakan teknik optimasi, kemudian dianalisis berdasarkan tiga skenario, yang masing-masing merupakan injeksi PVDG 2x0.5MW, 4x0.5MW, dan 6x0.5MW [5].

Injeksi masing-masing di lokasi bus yang berbeda. Stabilitas sudut voltase, frekuensi, dan rotor dianalisis untuk menunjukkan dampak dinamik PVDG selama kondisi kesalahan tiga fasa. Hasil analisis menunjukkan bahwa skenario kedua memberikan respon terbaik dalam hal respon rotor, voltase frekuensi, dan voltagerespons selama kondisi dinamis yang memasuki daya aktif sekitar 28,78% dari total beban. Daya injeksi PVDG pada skenario pertama (14,39% dari total beban) dan juga pada skenario ketiga (43,18% dari total beban) akan menghasilkan sudut rotor dan respons frekuensi dengan osilasi lebih banyak dibandingkan dengan skenario kedua. Namun, respon dinamis sistem untuk semua skenario menunjukkan osilasi teredam untuk mencapai kondisi steady-state [6].

Meningkatnya energi listrik diikuti pula dengan kenaikan kebutuhan pasokannya. Hal ini perlu adanya penambahan pembangkit baru. Dengan adanya pertumbuhan penduduk yang memerlukan listrik, dapat memberikan dampak terhadap kenaikan akan pasokan energi listrik. Pembangunan pembangkit harus melihat jenis dan tempatnya dan harus berdasarkan perhitungan teknik dan ekonomis [7].

Penurunan tegangan terjadi pada penyulang diakibatkan karena jauhnya sumber tegangan utama pada sistem tenaga listrik ke pusat beban. Model PLTS on grid memberikan dampak perbaikan tegangan pada sisi beban. Skenario pola

aliran daya menghasilkan kondisi aliran daya yang dapat menyebabkan penurunan nilai rugi rugi daya yang terjadi pada seluruh penyulang. Masuknya PLTS on grid skala besar dapat memberikan pengaruh pada kualitas tegangan operasi yang berada pada standar operasi jaringan [8].

Adanya peningkatan beban tanpa memperhatikan supply daya dalam hal ini adalah sistem pembangkit tenaga listrik yang ada di Gorontalo dapat memberikan perubahan aliran daya pada sistem kelistrikan Gorontalo pada sistem isolated tanpa interkoneksi dengan sistem minahasa [9].

1. Aliran Daya

Analisa aliran daya merupakan studi dasar dalam menganalisa suatu sistem Tenaga Listrik, baik untuk perencanaan maupun operasi. Pada dasarnya sasaran utama dari semua analisa aliran daya adalah menentukan besar dan sudut fasa tegangan pada setiap bus, dengan diketahuinya tegangan maka daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) dapat dihitung. Jika P dan Q pada dua buah bus diketahui maka aliran daya dengan jelas dapat diketahui, serta rugi-rugi daya saluran penghubung dapat diketahui.

Secara umum tujuan analisa aliran daya adalah:

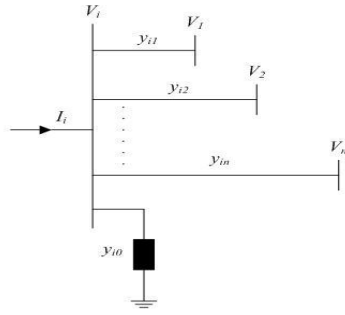
1. Untuk memeriksa tegangan dan sudut fasa masing-masing bus.
2. Untuk memeriksa kemampuan semua peralatan yang ada dalam sistem apakah cukup besar untuk menyalurkan daya yang diinginkan.
3. Untuk memperoleh kondisi awal bagi studi-studi selanjutnya, yakni studi hubung singkat, studi rugi-rugi transmisi dan studi stabilitas.

Ada 3 macam bus dalam hal ini setiap bus mempunyai empat besaran dengan dua besaran diantaranya diketahui yakni:

- a. BUS REFERENSI (**slack bus**). Adalah suatu bus yang selalu mempunyai besaran dan sudut fasa yang tetap dan telah diberikan sebelumnya, pada bus ini berfungsi untuk mencatu rugi-rugi, kekurangan daya yang ada pada jaringan, dalam hal ini penting karena kekurangan daya tidak dapat dicapai kecuali terdapat suatu bus yang mempunyai daya tak terbatas sehingga dapat mengimbangi rugi-rugi.
- b. BUS PQ (**bus beban**). Pada tipe bus ini daya aktif dan daya reaktif diketahui, sedangkan dua lainnya didapat dari hasil perhitungan.
- c. BUS PV (**bus pembangkit**). Pada tipe bus ini, besar tegangan dan daya aktif telah ditentukan sedangkan daya reaktif dan sudut fasa tegangan didapat dari hasil perhitungan.

2. Persamaan Aliran Daya

Biasanya sebuah saluran transmisi direpresentasikan dengan model ekuivalen π -nya dan implementasinya di ubah dalam sistem per-unit dengan basis MVA dan KV yang ditetapkan. Pemodelan sederhana suatu rel di dalam sistem tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Model Bus Sistem Tenaga Listrik

Berdasarkan Gambar 1. dapat diperoleh persamaan, menggunakan hukum arus kirchoff yaitu :

$$I_i = Y_{i0}V_i + Y_{i1}(V_i - V_1) + Y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + Y_{in}(V_i - V_n) \\ = (Y_{i0} + Y_{i1} + Y_{i2} + \dots + Y_{in}) V_i - Y_{i1}V_1 - Y_{i2}V_2 - \dots - Y_{in}V_n \quad (1)$$

Atau

$$I_i = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} \quad j \neq i \quad (2)$$

Daya aktif dan daya reaktif pada rel i adalah

$$P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (3)$$

Atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (4)$$

Substitusi persamaan (2) ke persamaan (4) maka akan di peroleh

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = V_i \sum_{j=0}^n Y_{ij} - \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (5)$$

Persamaan di atas merupakan persamaan matematis dari aliran daya yang kemudian akan di selesaikan dengan metode iterasi. Sedangkan tegangan pada rel yaitu:

$$V_i \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j \right) \quad j \neq i \quad (6)$$

Arus yang mengalir pada aliran daya akan menyebabkan terjadinya perubahan tegangan, baik *magnitude* maupun sudut fasanya. Karena alasan ini tegangan pada rel dijaga tetap pada batas-batas yang telah di tentukan.

3. Profil Tegangan

Jatuh tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada saluran energi listrik. Jatuh tegangan pada tenaga listrik pada umumnya berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luan penampang penghantar.

Jatuh tegangan ditimbulkan karena adanya resistansi pada penghantar, besar arus pada tiap fasa pada jaringan transmisi tegangan tinggi 150 kV di Gardu Induk Gorontalo berbeda-beda, maka untuk menghitung besar jatuh tegangan pada saluran transmisi menggunakan persamaan [10].

$$\Delta V = V_s - V_r \quad (7)$$

Dimana :

ΔV = Jatuh Tegangan (Volt)

V_s = Tegangan kirim (Volt)

V_r = Tegangan terima (Volt)

Persentase (%) Jatuh Tegangan :

$$\Delta V(\%) = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (8)$$

Dimana :

$\Delta V(\%)$ = Jatuh Tegangan dalam % (Volt)

V_s = Tegangan kirim (Volt)

V_r = Tegangan terima (Volt)

4. Rugi-rugi Daya

Rugi daya yang terjadi pada saluran transmisi sangat perlu di perhatikan, karena bisa menyebabkan hilangnya daya yang cukup besar. Rugi daya merupakan kehilangan energi yang sama sekali tidak mungkin di hindari. Arus yang mengalir pada penghantar mengakibatkan panas disekitar konduktor sehingga adanya daya yang terbuang selama proses pengiriman daya ke beban [11].

Rugi rugi daya yang besar dapat mengakibatkan kerugian pada perusahaan pemasok listrik. Panjang saluran suatu Gardu Induk dari Gardu induk yang satu ke Gardu induk yang lainnya dapat menyebabkan rugi daya yang cukup besar. untuk menghitung besarnya rugi rugi daya pada saluran transmisi dapat menggunakan persamaan sebagai berikut [12]:

$$P_{losses} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (9)$$

Keterangan :

P_{losses} : Rugi-rugi daya (watt)

I : Arus yang mengalir (amper)

R : Tahanan saluran (Ω /meter)

Kerugian perusahaan pemasok listrik disebabkan oleh hilangnya energi yang ditimbulkan dari rugi-rugi daya, sehingga dapat merugikan perusahaan pemasok energi listrik tersebut. Kerugian tersebut diakibatkan karena energi yang disalurkan tidak sama dengan besarnya energi yang diterima, sehingga energi yang disalurkan tidak dapat terjual seluruhnya [13].

5. Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu pembangkit yang mengkonversi energi foton dari surya menjadi energi listrik. Konversi ini terjadi pada panel surya yang terdiri dari sel-sel surya. PLTS ini memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC (*Direct Current*) yang dapat diubah menjadi listrik AC (*Alternating Current*) apabila diperlukan. PLTS pada dasarnya adalah pencatu daya dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik dari skala kecil sampai dengan skala besar, baik secara mandiri (*stand alone*), *on grid* (terhubung dengan jaringan PLN), maupun *Hybrid* [14].

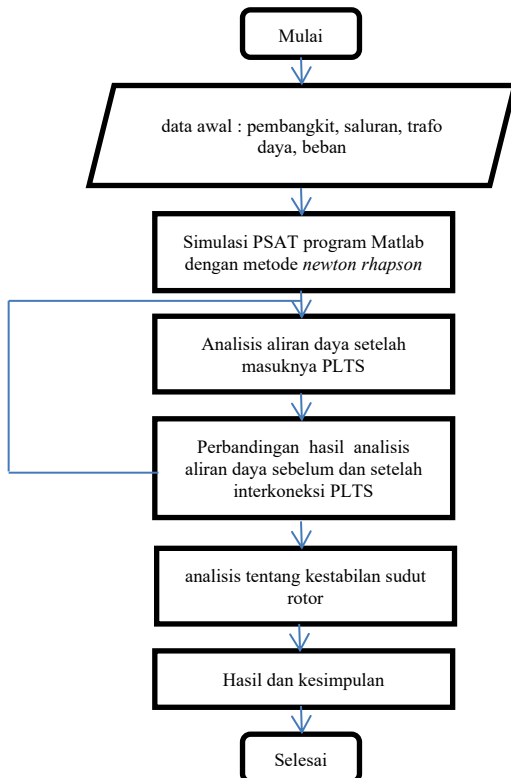
Modul surya (photovoltaic) adalah sejumlah sel surya yang dirangkai secara seri dan paralel, untuk meningkatkan tegangan dan arus yang dihasilkan sehingga cukup untuk pemakaian sistem catu daya beban. Untuk menghasilkan energi listrik yang maksimum permukaan modul harus selalu menghadap kearah matahari [15].

II. METODE

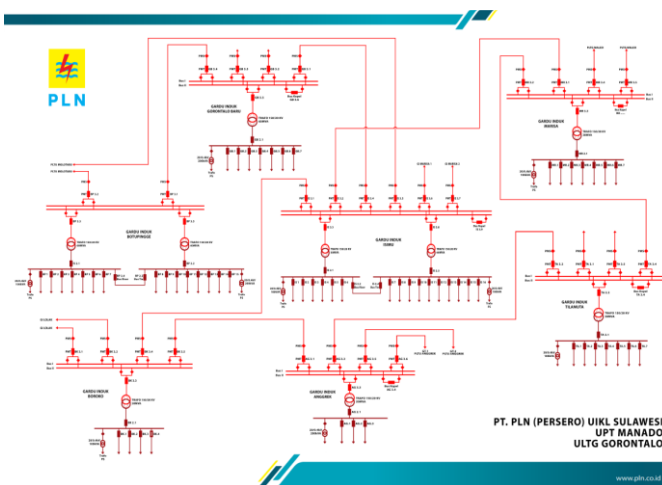
Objek Penelitian yaitu pada sistem Gorontalo 150 kV dan *out going* Gardu Induk (GI) 20 kV, Interkoneksi PLTS pada berada pada *out going* 20 kV GI Isimu. Metode yang digunakan untuk penyelesaian aliran daya adalah Metode Newton Raphson. Diagram Alir Penelitian dapat dilihat pada Gambar 2. Berikut ini adalah Tahapan tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan data berupa studi literature, data sistem kelistrikan Gorontalo yang meliputi, Gambar single line, data pembangkit, data saluran/penghantar, data trafo daya GI dan data beban. Gambar single line sistem Gorontalo dapat dilihat pada Gambar 3.

2. Pengolahan data sistem yang diperoleh dari lapangan. Untuk melakukan simulasi, data tersebut masih dihitung manual untuk mendapatkan nilai patokan dan diubah kedalam bentuk satuan per unit (pu).
3. Permodelan sistem dan penginputan data yang akan dimasukkan kedalam simulasi dengan bantuan software PSAT yang terintegrasi dengan program MATLAB dan dengan menggunakan metode Newton Rhapson.
4. Hasil simulasi dianalisis aliran daya dan kestabilan sudut rotor pada sistem Gorontalo ketika ada gangguan kecil sebelum dan setelah interkoneksi PLTS Isimu.
5. Tahap terakhir adalah melakukan perbandingan hasil analisis sebelum dan setelah interkoneksi PLTS Isimu.



Gambar 2. Diagram alir penelitian



Gambar 3. Single line sistem Gorontalo

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Simulasi Tegangan Sebelum Interkoneksi PLTS

Hasil dari simulasi tegangan sebelum interkoneksi PLTS merupakan hasil tegangan pada setiap bus Gardu Induk di sisi 150 kV dan 20 kV. Setelah didapatkan hasilnya maka dilakukan analisis tegangan yang terdapat pada setiap bus beban, bus beban tersebut terdapat pada masing-masing bus Gardu Induk (GI). Beban pada masing-masing GI terbaca pada bus tegangan 150 kV. Sehingga hasil simulasi tegangan sebelum interkoneksi PLTS dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Hasil Simulasi Tegangan Sebelum Interkoneksi PLTS

Bus GI	V	Phase
	[p.u.]	[rad]
GI AG 150	0,957322	-0,137702
GI AG 20	0,999359	-0,123153
GI BK 20	0,999338	-0,151166
GI BK 150	0,951915	-0,159192
GI BP 150	0,944806	-0,196681
GI BP 20	0,996295	-0,194699
GI GB 150	0,943630	-0,191484
GI GB 20	0,943628	-0,191484
GI IS 150	0,944591	-0,179865
GI IS 20	0,944589	-0,179865
GI MR 150	0,954070	-0,131454
GI MR 20	0,954068	-0,131454
GI TA 150	0,952209	-0,137735
GI TA 20	0,952207	-0,137735

Pada Tabel 1. terlihat bahwa hasil simulasi tegangan yang tertinggi terdapat pada GI Anggrek 150 kV sebesar 0.957322 pu dan tegangan terendah terdapat pada GI Gorontalo Baru yaitu 0.943630 pu. Hal ini menandakan bahwa tegangan yang ada pada masing-masing bus GI masih dalam batas standar SPLN yaitu 1.05 pu (+ 5 %) dan 0.90 pu (– 10%).

2. Hasil Simulasi Aliran Beban Sebelum Interkoneksi PLTS

Hasil simulasi aliran beban sebelum interkoneksi PLTS Isimu dengan menggunakan metode Newton-Rhapson dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Simulasi Aliran Beban Sebelum Interkoneksi PLTS

Dari Bus	Ke Bus	Daya Aktif	Daya Reaktif
		P [MW]	Q [MVar]
GI AG 150	GI BO150	17,592	-0,140
GI BO 150	GI IS 150	14,027	1,278
GI MR 150	GI TA 150	5,054	0,111
GI MR 150	GI IS 150	20,919	-1,014
GI IS 150	GI GB 150	21,933	-4,051
GI AG 150	GI TA 150	1,026	3,524
GI GB 150	GI BP 150	15,090	-8,414

Dari Tabel 2. terlihat bahwa hasil simulasi aliran beban sebelum interkoneksi PLTS terbesar terdapat pada bus GI Isimu menuju GI Gorontalo Baru yaitu daya aktif sebesar 21.933 MW dan daya reaktif sebesar -4.051 MVar. Sedangkan

aliran beban terendah terdapat pada bus GI Anggrek menuju GI Tilamuta yaitu daya aktif sebesar 1.026 MW dan daya reaktif yaitu sebesar 3.524 MVar.

3. Hasil Simulasi Rugi-rugi Daya Sebelum Interkoneksi PLTS

Hasil simulasi rugi-rugi daya sebelum interkoneksi PLTS Isimu dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Rugi-rugi Daya Sebelum Interkoneksi PLTS

Hasil	Pembangkit	Beban	Rugi-rugi Daya
Daya Aktif P[MW]	92,182	90,726	1,456
Daya Reaktif Q [MVar]	72,276	56,250	16,026
Daya Aktif P[%]		1,58%	
Daya Reaktif Q[%]		22,17%	

Dari Tabel 3. terlihat bahwa hasil simulasi rugi-rugi daya sebelum interkoneksi PLTS Isimu untuk daya aktif sebesar 1,456 MW dan untuk daya reaktif sebesar 16,026 MVar. Sedangkan perbandingan persentase rugi-rugi daya dengan pembangkitan total adalah untuk daya aktif sebesar 1,58 % dan daya reaktif sebesar 22,17%.

4. Hasil Simulasi Tegangan Setelah Interkoneksi PLTS

Dalam simulasi analisa aliran daya, sistem dimodelkan sesuai dengan diagram satu garis sistem Gorontalo dengan menginterkoneksi PLTS ke titik lokasi *out going* 20 kV Gardu Induk Isimu. Kawat penghantar yang digunakan adalah jenis kawat N2XSEYBY ukuran 240 mm² dengan panjang penghantar 8,7 km. Setelah sistem dimodelkan, kemudian di *running*. Hasil simulasi tegangan setelah interkoneksi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Tegangan Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Bus GI	V	phase
	[p.u.]	[rad]
GI AG 150	0,965558	-0,09728
GI AG 20	0,999459	-0,08243
GI BK 20	0,999469	-0,10667
GI BK150	0,962657	-0,11516
GI BP 150	0,956172	-0,14701
GI BP 20	0,997035	-0,14447
GI GB 150	0,956382	-0,14235
GI GB 20	0,95638	-0,14235
GI IS 150	0,959633	-0,13176
GI IS 20	0,998193	-0,09894
GI MR 150	0,962037	-0,09962
GI MR 20	0,962035	-0,09962
GI TA 150	0,960337	-0,10178
GI TA 20	0,960335	-0,10178

Pada Tabel 4.10 terlihat bahwa hasil simulasi tegangan 150 kV setelah interkoneksi PLTS Isimu yang tertinggi terdapat pada GI Anggrek sebesar 0.96558 pu dan tegangan terendah terdapat pada GI Botupinge yaitu 0.956172 pu. Hal ini menandakan bahwa tegangan yang ada pada masing-masing bus GI masih dalam batas standar SPLN yaitu 1.05 pu (+ 5 %) dan 0.90 pu (– 10%).

5. Hasil Simulasi Aliran Beban Setelah Interkoneksi PLTS

Hasil simulasi aliran beban setelah interkoneksi PLTS Isimu dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi Aliran Beban Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

From Bus	To Bus	Daya Aktif P	Daya Reaktif Q
		[MW]	[MVar]
GI AG 150	GI BO150	14,547	-1,478
GI BO150	GI IS 150	11,021	-0,909
GI MR 150	GI TA 150	1,996	0,833
PLTS Isimu	GI IS 20	10,000	11,218
GI MR 150	GI IS 150	13,711	-2,541
PLTG Maleo 150	GI MR 150	16,896	4,671
GI IS 150	PLTU Molotabu 150	0,288	-1,932
GI IS 150	GI GB 150	21,903	0,861
GI AG 150	GI TA 150	4,081	2,788
PLTU Molotabu 150	GI BP 150	17,679	2,195
GI GB 150	GI BP 150	15,065	-3,483
PLTU Anggrek 150	GI AG 150	12,405	1,383

Dari Tabel 5. terlihat bahwa hasil simulasi aliran beban setelah interkoneksi PLTS terbesar terdapat pada bus GI Isimu menuju GI Gorontalo Baru yaitu daya aktif sebesar 21.903 MW dan daya reaktif sebesar 0.861 MVar. Sedangkan aliran beban terendah terdapat pada bus GI Marisa menuju GI Tilamuta yaitu daya aktif sebesar 1.996 MW dan daya reaktif yaitu sebesar 0.833 MVar.

6. Hasil Simulasi Rugi-rugi Daya Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Hasil simulasi rugi-rugi daya sebelum interkoneksi PLTS Isimu dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Simulasi Rugi-rugi Daya Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Hasil	Pembangkit	Beban	Rugi-rugi Daya
Daya Aktif P[MW]	91,781	90,726	1,055
Daya Reaktif Q[MVar]	68,443	56,250	12,193
Daya Aktif P[%]		1,15%	
Daya Reaktif Q [%]		17,82%	

Dari Tabel 4.12 terlihat bahwa hasil simulasi rugi-rugi daya setelah interkoneksi PLTS Isimu untuk daya aktif sebesar 1,055 MW dan untuk daya reaktif sebesar 12,193 MVar. Sedangkan perbandingan persentase rugi-rugi daya dengan pembangkitan total adalah untuk daya aktif sebesar 1,15 % dan daya reaktif sebesar 17,82%.

7. Perbandingan Hasil Simulasi Tegangan Sebelum dan Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Perbandingan simulasi tegangan sebelum dan setelah interkoneksi PLTS untuk tegangan disetiap bus dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Perbandingan Simulasi Sebelum dan Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Bus	Sebelum in PLTS		Setelah in PLTS	
	V [p.u.]	Phase[rad]	V [p.u.]	Phase[rad]
GI AG 150	0,957322	-0,137702	0,965558	-0,09728

Bus	Sebelum in PLTS		Setelah in PLTS	
	V [p.u.]	Phase[rad]	V [p.u.]	Phase[rad]
GI AG 20	0,999359	-0,123153	0,999459	-0,08243
GI BK 20	0,999338	-0,151166	0,999469	-0,10667
GI BK150	0,951915	-0,159192	0,962657	-0,11516
GI BP 150	0,944806	-0,196681	0,956172	-0,14701
GI BP 20	0,996295	-0,194699	0,997035	-0,14447
GI GB 150	0,943630	-0,191484	0,956382	-0,14235
GI GB 20	0,943628	-0,191484	0,95638	-0,14235
GI IS 150	0,944591	-0,179865	0,959633	-0,13176
GI IS 20	0,944589	-0,179865	0,998193	-0,09894
GI MR 150	0,954070	-0,131454	0,962037	-0,09962
GI MR 20	0,954068	-0,131454	0,962035	-0,09962
GI TA 150	0,952209	-0,137735	0,960337	-0,10178
GI TA 20	0,952207	-0,137735	0,960335	-0,10178
PLTS Isimu			1	-0,093364

Pada Tabel 7 terlihat bahwa perbandingan hasil simulasi tegangan sebelum dan setelah interkoneksi PLTS Isimu, yakni sebelum interkoneksi tegangan yang berada pada bus GI Isimu 150 kV adalah sebesar 0,944591 pu, Setelah interkoneksi dari PLTS Isimu maka tegangan yang ada pada bus GI Isimu 150 kV naik menjadi 0.965558 pu. Sama halnya dengan bus GI lainnya yang terdapat kenaikan tegangan dari sebelum interkoneksi PLTS Isimu dan setelah Interkoneksi PLTS Isimu. Rata- rata kenaikan tegangan pada bus GI pada sisi 150 kV adalah sebesar 1,06 % sedangkan pada sisi 20 kV adalah sebesar 1,19 %. Dengan adanya interkoneksi PLTS Isimu pada sistem kelistrikan di Gorontalo dapat memberikan pengaruh terhadap profil tegangan. Pengaruhnya adalah berupa kenaikan tegangan pada setiap bus GI. Hal ini disebabkan oleh supplay daya dari pembangkit utama masih lebih besar dari konsumen GI. Terdapat kelebihan daya yang mengalir kembali kearah GI Isimu. Sehingga membuat tegangan pada setiap bus sistem kelistrikan di Gorontalo menjadi lebih baik dan masih dalam batas-batas yang diizinkan menurut standar SPLN yaitu 1.05 pu (+ 5 %) dan 0.90 pu (– 10%).

8. Perbandingan Hasil Simulasi Aliran Beban Sebelum dan Sesudah Interkoneksi PLTS Isimu

Perbandingan simulasi aliran daya sebelum dan setelah interkoneksi PLTS untuk aliran beban disetiap bus dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan simulasi aliran beban sebelum dan setelah interkoneksi PLTS

Dari Bus	Ke Bus	Sebelum In PLTS		Setelah In PLTS	
		P [MW]	Q [MVar]	P [MW]	Q [MVar]
GI AG 150	GI BO150	17,592	-0,140	14,547	-1,478
GI BO 150	GI IS 150	14,027	1,278	11,021	-0,909
GI MR 150	GI TA 150	5,054	0,111	1,996	0,833
GI MR 150	GI IS 150	20,919	-1,014	13,711	-2,541
GI IS 150	GI GB 150	21,933	-4,051	21,903	0,861
GI AG 150	GI TA 150	1,026	3,524	4,081	2,788
GI GB 150	GI BP 150	15,090	-8,414	15,065	-3,483
PLTS Isimu	GI IS 20			10,000	11,218

Dari Tabel 8. terlihat bahwa hasil perbandingan simulasi aliran beban sebelum dan setelah interkoneksi PLTS, yakni aliran beban sebelum interkoneksi dari bus GI Isimu menuju GI Gorontalo Baru untuk daya aktif adalah sebesar 21, 933 MW dan untuk daya reaktif adalah -4,051 MVar. Setelah interkoneksi PLTS Isimu maka aliran beban dari GI Isimu menuju GI Gorontalo Baru untuk daya aktif adalah sebesar 21.903 MW dan untuk daya reaktif adalah 0.861 MVar. Terlihat terjadi penurunan aliran beban untuk daya aktif dari GI Isimu menuju GI Gorontalo Baru dan untuk aliran beban daya reaktif mengalami kenaikan. Hal tersebut terjadi hampir pada setiap aliran beban antar bus GI. Sedangkan aliran beban dari GI Anggrek menuju GI Tilamuta untuk daya aktif mengalami kenaikan yaitu sebelum interkoneksi adalah 1,026 MW dan setelah interkoneksi PLTS Isimu menjadi 4,081 MW sedangkan daya reaktif mengalami penurunan dari 3,524 MVar menjadi 2,788 MVar. Hal ini disebabkan karena GI Isimu yang merupakan titik lokasi interkoneksi dari PLTS Isimu tidak terhubung langsung dengan GI Anggrek, tetapi GI Isimu terhubung langsung dengan GI Tilamuta, sehingga memperlihatkan adanya kenaikan aliran beban daya aktif terhadap GI Anggrek menuju GI Tilamuta.

9. Hasil Perbandingan Rugi-rugi Daya Sebelum dan Sesudah Intekoneksi PLTS Isimu

Perbandingan hasil simulasi rugi-rugi daya sebelum dan setelah interkoneksi PLTS Isimu dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbadingan hasil Simulasi Rugi-rugi Daya Sebelum dan Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

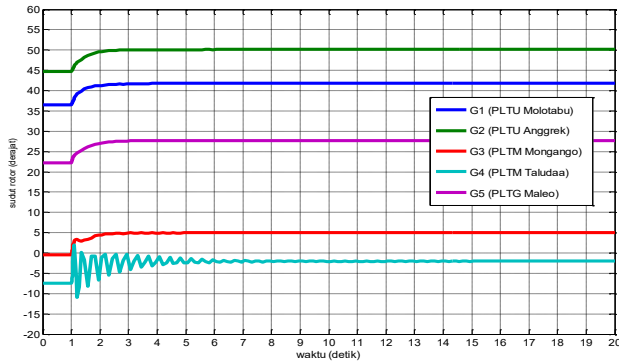
Hasil	Perbandingan Rugi-rugi Daya	
	Sebelum In PLTS	Setelah In PLTS
Daya Aktif P[MW]	1,456	1,055
Daya Reaktif Q[MVar]	16,026	12,193
Daya Aktif P[%]	1,58%	1,15%
Daya Reaktif Q[%]	22,17%	17,28%

Dari Tabel 9. terlihat bahwa perbandingan hasil simulasi rugi-rugi daya sebelum dan setelah interkoneksi PLTS Isimu, yakni sebelum interkoneksi untuk daya aktif sebesar 1,456 MW dan daya reaktif sebesar 16,026 MVar. Setelah interkoneksi PLTS Isimu rugi-rugi daya untuk daya aktif adalah sebesar 1,055 MW dan untuk daya reaktif sebesar 12,193 MVar. Terjadi penurunan rugi-rugi daya untuk daya aktif sebesar 401 kW dan daya reaktif sebesar 3,833 MVar. Sedangkan perbandingan persentase rugi-rugi daya sebelum dan setelah interkoneksi PLTS isimu untuk daya aktif adalah sebesar 0,43 % dan daya reaktif 4,89 %. Dengan adanya interkoneksi PLTS Isimu ini memberikan pengaruh terhadap sistem kelistrikan di Gorontalo dengan memperkecil rugi-rugi daya, sehingga memberikan performance sistem kelistrikan Gorontalo yang lebih baik.

10. Analisis Kestabilan Sudut Rotor Sebelum Interkoneksi PLTS

Melakukan analisis sudut rotor pada sistem kelistrikan Gorontalo, pada simulasi *steady state* generator PV diganti dengan *Synchronous Machine*, yang dilengkapi dengan *Automatic Voltage Regulator (AVR)*, *Turbine Governor (TG)* serta *Fault*.

Hasil stabilitas sudut rotor sistem kelistrikan Gorontalo sebelum interkoneksi PLTS Isimu dapat ditunjukkan pada Gambar 4. Hasil stabilitas digunakan generator G1 (PLTG Maleo) sebagai referensi Angle, G2, G3, G4 dan G5 karena sistem Gorontalo menggunakan berbagai jenis pembangkit daya listrik (PLTG, PLTM dan PLTU) dengan beberapa unit pembangkit yang berbeda-beda sehingga dipilih sudut rotornya yang berbeda.



Gambar 4. Grafik $f(t)$ Sebelum Interkoneksi PLTS Isimu

Pada Gambar 4. hasil simulasi grafik sudut rotor fungsi waktu dapat dilihat dalam bentuk Tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel 10, yang mana saat sistem mengalami gangguan pada detik 1.

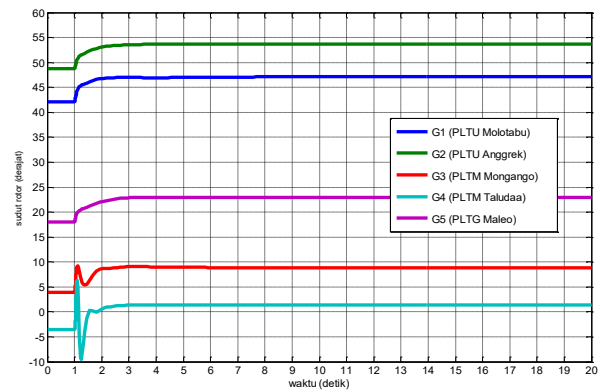
Tabel 10. Stabilitas Sudut Rotor Sebelum Interkoneksi PLTS Isimu

Gen	Ayunan (derajat)	Awal (derajat)	Selama Gangguan (derajat)	Baru (derajat)	Steady state (detik)
G1	max	36,4	41,7	41,8	8,3
	min		-		
G2	max	44,6	50	51	6,4
	min		-		
G3	max	-0,4	4,9	4,8	9,9
	min		2,7		
G4	max	-7,4	1,8	-2,1	11,4
	min		-10,9		
G5	max	22,3	27,6	27,7	6,9
	min		-		

Pada Tabel 10. terlihat bahwa sudut rotor mengalami perubahan dan dapat kembali stabil dengan sudut yang baru, dengan waktu pemulihan untuk G1, G2, G3, G4 dan G5 selama 8,3 detik, 6,4 detik, 9,9 detik, 11,4 detik dan 6,9 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

11. Kestabilan Sudut Rotor Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Hasil stabilitas sudut setelah interkoneksi PLTS Isimu dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil simulasi grafik sudut rotor fungsi waktu dapat dilihat dalam bentuk Tabel, seperti ditunjukkan pada Tabel 11, yang mana saat sistem mengalami gangguan pada detik 1.



Gambar 5. Grafik $f(t)$ Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Tabel 11. Stabilitas Sudut Rotor Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Gen	Ayunan (derajat)	Awal (derajat)	Selama Gangguan (derajat)	Baru (derajat)	Steady state (detik)
G1	max	42,1	46,9	47,1	7,2
	min		46,8		
G2	max	48,7	53,6	52,7	8
	min		-		
G3	max	3,9	9,2	8,8	9,6
	min		5,4		
G4	max	-3,5	6,1	1,4	6,1
	min		-9,5		
G5	max	17,9	22,9	29,5	7
	min				

Pada Tabel 11. terlihat bahwa sudut rotor mengalami perubahan dan dapat kembali stabil dengan sudut yang baru, dengan waktu pemulihan untuk G1, G2, G3, G4 dan G5 selama 7,2 detik, 8 detik, 9,6 detik, 6,1 detik dan 7 detik setelah gangguan dihilangkan dari sistem.

12. Perbandingan Kestabilan Sudut Rotor Sebelum dan Sesudah Interkoneksi PLTS Isimu

Perbandingan sudut rotor sebelum dan setelah interkoneksi PLTS Isimu dengan gangguan pada GI Isimu, dapat terlihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Perbandingan Sudut Rotor Sebelum dan Setelah Interkoneksi PLTS Isimu

Gen	Sebelum		Setelah	
	(derajat)	tpemulihan (s)	(derajat)	tpemulihan (s)
G1	36,4	8,3	42,1	7,2
G2	44,6	6,4	48,7	8
G3	-0,4	9,9	3,9	9,6
G4	-7,4	11,4	-3,5	6,1
G5	22,3	6,9	17,9	7

Dari Tabel 12. perbandingan sudut rotor dimana dapat dilihat terjadi perbaikan sudut rotor generator sebelum dan setelah interkoneksi PLTS Isimu dan waktu pemulihan generator untuk kembali ke steady state membutuhkan waktu rata-rata 1 detik setelah interkoneksi PLTS Isimu. Dengan adanya interkoneksi PLTS Isimu ini memberikan pengaruh terhadap kestabilan sudut rotor generator terhadap pembangkit lainnya. Pada saat terjadi gangguan dengan durasi waktu yang singkat, sistem kelistrikan di Gorontalo berada dalam kondisi stabil, dimana setelah mengalami gangguan, sudut rotor dapat kembali pada operasi normalnya.

Hal ini disebabkan oleh adanya tambahan daya aktif dari area lokal GI Isimu.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis sistem tenaga listrik Gorontalo terhadap masuknya PLTS Isimu dengan kapasitas 10 MWp, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut : 1). Masuknya PLTS Isimu pada sistem tenaga listrik Gorontalo di Gardu Induk Isimu sisi 20 kV adalah dapat langsung memperbaiki profil tegangan pada setiap bus Gardu Induk dengan rata-rata persentase kenaikan 1,06%; 2). Setelah terinterkoneksi PLTS Isimu pada sistem tenaga listrik Gorontalo dapat memberikan rugi-rugi daya sangat kecil dengan persentase peneurunan sebesar 0,43%. Sehingga memberikan performance sistem lebih baik.; 3). Pada saat terjadi gangguan dengan durasi waktu singkat, sistem tenaga listrik di Gorontalo berada dalam kondisi stabil, dimana setelah mengalami gangguan sudut rotor generator dapat kembali pada operasi normalnya

REFERENSI

- [1] John J. Grainger and William D. Stevenson, J. (1994). Power System Analysis. *Power System Analysis*. Retrieved from http://bank.engzenon.com/download/4f8aebfd-dd9c-4adb-a56c-58fb4ad0ed3b/Power_System_Analysis_John_Grainger_1st.pdf.
- [2] PT. PLN (Persero) ULTG Gorontalo, 2019.
- [3] PT. PLN (Persero) UP3 Gorontalo, 2019
- [4] PT. Quantum Solar Gorontalo, 2019
- [5] Zainuddin, M., Sarjiya, Handayani, T. P., Sunanda, W., & Surusa, F. E. P. (2018). Transient Stability Assessment of Large Scale Grid-Connected Photovoltaic on Transmission System. *Proceedings - 2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications, ICGEA 2018*, (March), 113–118.
- [6] Suyono, H., & Zainuddin, M. (2015). Injection Impact of Photovoltaic Distributed Generations (PVDG) on Power Distribution System Stability. *Applied Mechanic and materials*, 403–408.
- [7] Frengki, Suyono, Wijono. (2016). Analisis Steady State dan Dinamik pada Perencanaan Pengembangan Pembangkit Sistem Gorontalo. *E-JAEI*, 9–14.
- [8] Zainuddin, M. (2017). Pengaruh Masuknya PLTS on Grid Skala Besar Pada Sistem Distribusi 20 KV Terhadap Kualitas Tegangan dan Rugi-rugi Daya. *Prosiding Seminar Nasional FORTEI*, (October 2017), 131–136.
- [9] Ervan Hasan Harun, ST., MT dan Taufiq Ismail Yusuf, ST., M. S. (2012). *Analisa Aliran Daya pada Sistem Tenaga Listrik 150 kV Gorontalo Menggunakan Metode Newton Raphson*.
- [10] Hariyadi, S. (2017). Analisa Rugi-rugi daya dan Jatuh Tegangan pada Saluran Transmisi Tegangan Tinggi 150 KV pada Gardu Induk Salur-Masaran Disusun. *Universitas Muhammadiyah Surakarta*, (1–16).
- [11] Muhammad Radil, Riad Syech, S. (2014). *Analisis Rugi-rugi Daya pada Saluran Transmisi Tegangan 150 kV dari Gardu Induk Koto Panjang ke Gardu Induk Garuda Sakti Pekan Baru*. 1(2), 193–198.
- [12] Arismunandar Artono & S. Kuwahara (1993). *Tenik Tenaga Listrik*. Jilid II. Pradnya Paramitha. Jakarta.
- [13] Dewantara, M. (2018). *Analisis rugi-rugi daya pada saluran transmisi tegangan tinggi 150 kv dari gardu induk wonogiri sampai gardu induk wonosari*.
- [14] E.M Suryanti, Rosmallati, I.B.F. Citarsa (2014). *Analisis Unjuk Kerja sistem fotovoltaik On-Grid pada Pembangkit Tenaga Surya (PLTS) Gili Trawangan, Dielektrika, Vol. 1, No. 2, 82-95*.
- [15] Gultom, T. T. (2015). Pemanfaatan Photovoltaic Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya. *Jurnal Mudira Indure*, 1(3), 33–42.