

ANALISIS DAMPAK PENETRASI TINGGI PLTS TERHADAP RESPONS FREKUENSI PADA SISTEM TRANSMISI INTERKONEKSI

Nurul Muhammad Farouq¹, Nurmela²

Universitas Siliwangi^{1,2}

Email: 227002004@student.unsil.ac.id

Informasi

Volume : 3
Nomor : 6
Bulan : Juni
Tahun : 2026
E-ISSN : 3062-9624

Abstract

The integration of Solar Photovoltaic (PV) power plants into power systems has become one of the main strategies to support Indonesia's energy transition targets as outlined in the 2025–2034 Electricity Supply Business Plan (RUPTL). One of the planned projects is a 126 MW PV power plant that will be connected to the 150 kV Central Kalimantan transmission system. Although it increases the utilization of renewable energy, high PV penetration may affect system frequency response due to the reduced contribution of synchronous generator inertia. This study aims to analyze the impact of PV integration on system frequency response using Root Mean Square (RMS) simulations in DIgSILENT PowerFactory. The evaluation was conducted through PV disconnection scenarios at penetration levels of 25%, 50%, 75%, and 100%, as well as the outage of the largest generating unit. The results show that increasing PV penetration decreases the frequency nadir from 49.944 Hz to 49.778 Hz and increases the Rate of Change of Frequency (RoCoF) from 0.530 Hz/s to 2.154 Hz/s. In the largest generator outage scenario, RoCoF increases from 1.199 Hz/s to 1.257 Hz/s without significant changes in the other frequency response parameters. The results indicate that the integration of the 126 MW PV power plant can still be accommodated by the 150 kV Central Kalimantan system without significant degradation of frequency response performance.

Keyword: Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS); Stabilitas Frekuensi; Rate of Change of Frequency (RoCoF); DIgSILENT PowerFactory.

Abstrak

Integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dalam sistem tenaga listrik menjadi salah satu strategi utama untuk mendukung target transisi energi nasional sebagaimana tercantum dalam RUPTL 2025–2034. Salah satu proyek yang direncanakan adalah PLTS Kalimantan Tengah berkapasitas 126 MW yang akan terhubung pada sistem 150 kV Kalimantan Tengah. Meskipun meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, penetrasi PLTS yang tinggi berpotensi memengaruhi karakteristik respons frekuensi sistem akibat berkurangnya kontribusi inersia generator sinkron. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh integrasi PLTS terhadap respons frekuensi sistem menggunakan simulasi Root Mean Square (RMS) pada perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Evaluasi dilakukan melalui skenario pelepasan PLTS pada tingkat penetrasi 25%, 50%, 75%, dan 100%, serta skenario pelepasan generator terbesar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS menyebabkan frekuensi nadir menurun dari 49,944 Hz menjadi 49,778 Hz dan nilai Rate of Change of Frequency (RoCoF) meningkat dari 0,530 Hz/detik menjadi 2,154 Hz/detik. Pada skenario pelepasan generator terbesar, nilai RoCoF meningkat dari 1,199 Hz/detik menjadi 1,257 Hz/detik tanpa perubahan signifikan pada parameter frekuensi lainnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi PLTS 126 MW masih dapat diakomodasi oleh sistem 150 kV Kalimantan Tengah tanpa menyebabkan penurunan signifikan terhadap kinerja respons frekuensi sistem.

Kata Kunci: Solar Power Plant (PLTS); Frequency Stability; Rate of Change of Frequency (RoCoF); DigSILENT PowerFactory.

A. PENDAHULUAN

Pemerintah Indonesia terus mendorong percepatan transisi energi melalui peningkatan pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) dalam sistem ketenagalistrikan nasional. Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN 2025–2034, direncanakan penambahan kapasitas pembangkit EBT sebesar 42.569 MW hingga tahun 2034.

Dari total kapasitas tersebut, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi kontributor terbesar dengan rencana penambahan kapasitas mencapai 17,062 MW atau sekitar 40% dari total pengembangan pembangkit EBT. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa PLTS akan memiliki peran yang semakin dominan dalam mendukung transformasi sistem tenaga listrik nasional menuju sistem yang lebih berkelanjutan [1].

Pengembangan PLTS tidak hanya difokuskan pada sistem kelistrikan Jawa, tetapi juga diarahkan pada berbagai sistem interkoneksi di luar Jawa, termasuk Kalimantan. Salah satu proyek yang direncanakan adalah pembangunan PLTS Kalimantan Tengah berkapasitas 160 MWp yang akan terhubung ke sistem transmisi 150 kV Kalimantan Tengah pada tahun 2027 seperti yang ditunjukkan Gambar 1 [1].

Tabel A13.11. Rencana Pengembangan Pembangkit

No	Sistem	Jenis	Pembangkit	Kapasitas (MW)	Skenario COD		Status	Pengembang
					RE Base	ARED		
1	Barito	PLTS	Kalseltengtimra-5 (PLTS+BESS)	160	-	2027	Rencana	IPP
2	Barito	BESS	Kalseltengtimra-5 (PLTS+BESS)	100	-	2027	Rencana	IPP
3	Barito	PLTU MT	Kalselteng 3	200,0	2029	2029	Committed	IPP
4	Barito	PLTBg	Kalimantan (Kuota Tersebar ²)	3,8	2029	2029	Rencana	IPP
5	Barito	PLTG	Kalimantan-2	100,0	2029	-	Rencana	SH-PLN
6	Barito	PLTU	Sampit	50,0	2030	2033	Konstruksi	PLN
7	Barito	PLTS	MT Hybrid Kalselteng 4	40,0	2032	2032	Rencana	IPP
8	Barito	BESS	MT Hybrid Kalselteng 4	25,0	2032	2032	Rencana	IPP
9	Barito	PLTU MT	MT Hybrid Kalselteng 4	200,0	2032	2032	Rencana	IPP
10	Barito	PLTA	Muara Julis	340 ¹⁾	2032/2033	2032/2033	Rencana	SH-PLN
11	Isolated	PLTS	Lides Kalteng	0,6	2026	2026	Rencana	PLN
12	Isolated	PLTS	Lides Kalteng	13,8	2027	2027	Rencana	PLN
13	Isolated	PLTS	Dedieselisasi	0,8	2027	2027	Pengadaan	IPP
14	Isolated	PLTS	Isolated Kalteng	0,2	2030	2030	Rencana	IPP
15	Isolated	PLTS+BESS	Isolated Kalteng	0,2	2033	2033	Rencana	IPP
Jumlah				894,4				

1) Kapasitas bendungan PUPK, sehingga kapasitas pembangkitnya berkurang
2) Merupakan kuota PLTBg/PLTBg Kalimantan, di mana penempatan pembangkit tidak dedicated di Provinsi Kalbar, namun dapat juga di provinsi lain sesuai kebutuhan setempat

Gambar 1. Rencana Pengembangan Pembangkit di Sistem Kalimantan berdasarkan RUPTL 2025–2034

Integrasi PLTS dalam kapasitas besar tersebut diharapkan mampu meningkatkan porsi energi bersih dalam bauran energi regional sekaligus mendukung pertumbuhan kebutuhan energi listrik di wilayah Kalimantan Tengah [1].

Peningkatan penetrasi PLTS dalam sistem tenaga listrik menghadirkan peluang sekaligus tantangan bagi operator sistem. Karakteristik PLTS yang terhubung ke jaringan melalui

inverter menyebabkan perilaku dinamis sistem menjadi berbeda dibandingkan sistem yang didominasi pembangkit konvensional. Perubahan komposisi pembangkitan menuju dominasi sumber daya berbasis inverter menuntut evaluasi terhadap keandalan dan keamanan operasi sistem tenaga listrik, khususnya pada kondisi gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan daya pembangkitan dan daya beban [2].

Berkurangnya kontribusi pembangkit sinkron dalam sistem tenaga listrik dapat memengaruhi karakteristik respons frekuensi setelah terjadinya gangguan. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan frekuensi berubah lebih cepat dan meningkatkan sensitivitas sistem terhadap ketidakseimbangan daya. Oleh karena itu, kajian respons frekuensi menjadi semakin penting seiring meningkatnya penetrasi energi terbarukan dalam sistem tenaga listrik modern [3].

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengevaluasi dampak integrasi pembangkit energi terbarukan terhadap stabilitas frekuensi sistem tenaga listrik. Integrasi PLTS pada sistem kelistrikan Bali dilaporkan memengaruhi karakteristik frekuensi sistem yang ditinjau dari parameter *RoCoF*, deviasi frekuensi, dan waktu pemulihan frekuensi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS dapat mengubah respons dinamis sistem setelah gangguan terjadi [4].

Pengaruh integrasi PLTS terhadap stabilitas frekuensi juga ditemukan pada sistem kelistrikan Lombok. Integrasi PLTS menyebabkan perubahan karakteristik kestabilan frekuensi sehingga diperlukan evaluasi untuk memastikan frekuensi sistem tetap berada dalam batas operasi yang diizinkan pada berbagai kondisi operasi sistem tenaga listrik [5].

Kajian pada sistem transmisi 150 kV Bali menunjukkan bahwa integrasi PLTS skala besar dapat memengaruhi nilai *Rate of Change of Frequency (RoCoF)* dan frekuensi minimum sistem ketika terjadi gangguan pembangkit maupun perubahan beban. Karakteristik respons frekuensi yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh tingkat penetrasi energi terbarukan, kapasitas pembangkitan eksisting, serta konfigurasi jaringan yang digunakan pada sistem tenaga listrik yang ditinjau [6]. Pengaruh komposisi pembangkitan terhadap respons frekuensi juga ditunjukkan pada sistem Sulawesi Bagian Selatan, di mana perubahan penetrasi pembangkit energi terbarukan menyebabkan perubahan karakteristik *RoCoF* dan kestabilan frekuensi sistem setelah gangguan [7].

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa integrasi energi terbarukan memengaruhi karakteristik respons frekuensi sistem tenaga listrik, kajian mengenai dampak integrasi PLTS pada sistem interkoneksi Kalimantan Tengah masih sangat terbatas. Selain itu,

belum ditemukan penelitian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh integrasi PLTS Kalimantan Tengah berkapasitas 126 MW sesuai rencana pengembangan dalam RUPTL 2025–2034 terhadap karakteristik respons frekuensi sistem menggunakan simulasi *Root Mean Square* (RMS) pada perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory.

Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi karakteristik respons frekuensi sistem 150 kV Kalimantan Tengah akibat integrasi PLTS berkapasitas 126 MW pada berbagai tingkat penetrasi yang merepresentasikan skenario pengembangan PLTS berdasarkan RUPTL 2025–2034. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter *Rate of Change of Frequency (RoCoF)*, frekuensi nadir, waktu nadir, dan waktu pemulihan frekuensi untuk menilai pengaruh integrasi PLTS terhadap kinerja frekuensi sistem. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis dampak integrasi PLTS terhadap respons frekuensi sistem 150 kV Kalimantan Tengah menggunakan simulasi RMS pada perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory.

TINJAUAN PUSTAKA

Stabilitas Frekuensi Pada Sistem Tenaga Listrik

Stabilitas frekuensi merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan frekuensi berada dalam batas operasi yang dapat diterima setelah mengalami gangguan atau perubahan kondisi operasi [8]. Stabilitas ini berkaitan dengan kemampuan sistem dalam menjaga keseimbangan antara daya pembangkitan dan daya beban pada seluruh area sistem tenaga listrik [9].

Ketidakseimbangan antara daya mekanik yang dihasilkan pembangkit dan daya listrik yang dikonsumsi beban akan menyebabkan perubahan frekuensi sistem [10]. Hubungan antara ketidakseimbangan daya dan perubahan frekuensi sistem dapat dijelaskan melalui persamaan ayunan (*swing equation*) yang dinyatakan pada Persamaan (1).

$$\left[\frac{2H}{f_0} \frac{df}{dt} = P_m - P_e \right] \quad 1)$$

dengan H merupakan konstanta inersia sistem (detik), f_0 adalah frekuensi nominal sistem (Hz), P_m adalah daya mekanik pembangkit (p.u.), dan P_e adalah daya listrik yang disuplai ke sistem (p.u.). Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan frekuensi terjadi akibat ketidakseimbangan antara daya pembangkitan dan daya beban. Semakin besar ketidakseimbangan daya, semakin besar laju perubahan frekuensi yang terjadi pada sistem tenaga listrik [11].

Respons frekuensi sistem sangat dipengaruhi oleh karakteristik dinamis generator sinkron yang menyediakan energi kinetik tersimpan dalam massa berputar rotor atau dikenal

sebagai inersia sistem [9]. Inersia berfungsi memperlambat laju perubahan frekuensi sesaat setelah terjadi gangguan sehingga memberikan waktu bagi sistem kendali untuk merespons ketidakseimbangan daya [11].

Pada sistem tenaga modern, meningkatnya penetrasi pembangkit berbasis konverter seperti PLTS dan pembangkit angin menyebabkan berkurangnya kontribusi inersia alami dari generator sinkron. Penurunan inersia sistem dapat meningkatkan laju perubahan frekuensi atau *Rate of Change of Frequency (RoCoF)* setelah gangguan sehingga risiko ketidakstabilan frekuensi menjadi lebih besar [11], [12], [13]

Oleh karena itu, analisis stabilitas frekuensi menjadi aspek penting dalam perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi [14]. Evaluasi stabilitas frekuensi diperlukan untuk memastikan sistem tetap mampu mempertahankan keandalan operasi ketika terjadi gangguan pembangkit maupun perubahan beban secara tiba-tiba [15].

Integrasi PLTS Dan Dampaknya Terhadap Respons Frekuensi

Meningkatnya penetrasi PLTS dalam sistem tenaga listrik menyebabkan berkurangnya dominasi generator sinkron yang beroperasi sehingga total inersia sistem cenderung menurun [16]. Kondisi ini mendorong terjadinya transisi dari sistem tenaga listrik yang didominasi generator sinkron menuju sistem yang semakin didominasi sumber daya berbasis inverter [14].

Berbeda dari generator sinkron yang memanfaatkan massa berputar untuk sumber energi kinetik, pembangkit listrik tenaga surya terhubung ke dalam grid melalui inverter, sehingga tidak memberikan inersia alami untuk sistem kelistrikan [9]. Akibatnya, peningkatan penetrasi PLTS berpotensi meningkatkan laju perubahan frekuensi (*RoCoF*) dan memperdalam penurunan frekuensi setelah gangguan terjadi [9], [11].

Penurunan inersia sistem akibat tingginya penetrasi pembangkit berbasis inverter dapat menyebabkan frekuensi berubah lebih cepat setelah terjadinya gangguan [12]. Kondisi ini ditunjukkan oleh meningkatnya nilai *Rate of Change of Frequency (RoCoF)* dan semakin besarnya risiko penyimpangan frekuensi dari batas operasi yang diizinkan. Oleh karena itu, sistem dengan tingkat inersia yang rendah umumnya lebih rentan terhadap masalah stabilitas frekuensi dibandingkan sistem yang masih didominasi generator sinkron [13].

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS dapat memengaruhi respons frekuensi sistem tenaga listrik. Penetrasi PLTS yang tinggi pada jaringan distribusi dapat menyebabkan frekuensi sistem keluar dari batas operasi yang dipersyaratkan

apabila tidak didukung oleh mekanisme pengendalian yang memadai. Hasil penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS berpengaruh terhadap karakteristik frekuensi sistem sehingga perlu dilakukan evaluasi pada berbagai tingkat penetrasi untuk memastikan keandalan operasi sistem tenaga listrik [16], [17].

Karakteristik Respons Frekuensi Sistem

Respons frekuensi sistem menggambarkan perilaku frekuensi setelah terjadi gangguan yang menyebabkan ketidakseimbangan antara daya pembangkitan dan daya beban. Ketika terjadi kehilangan pembangkit atau perubahan beban secara tiba-tiba, frekuensi sistem akan mengalami deviasi dari nilai nominal hingga mencapai kondisi operasi yang baru. Oleh karena itu, karakteristik respons frekuensi digunakan sebagai indikator penting dalam mengevaluasi kemampuan sistem tenaga listrik mempertahankan kestabilan setelah gangguan [8].

Salah satu parameter utama dalam analisis respons frekuensi adalah *Rate of Change of Frequency (RoCoF)* yang menunjukkan laju perubahan frekuensi sesaat setelah gangguan terjadi. Nilai *RoCoF* dapat dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$RoCoF = \frac{df}{dt} \quad 2)$$

dengan df merupakan perubahan frekuensi (Hz) dan dt merupakan perubahan waktu (detik). Nilai *RoCoF* yang semakin besar menunjukkan frekuensi berubah semakin cepat sehingga sistem memiliki waktu yang lebih sedikit untuk merespons gangguan. Pada sistem dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi, nilai *RoCoF* cenderung meningkat akibat berkurangnya kontribusi inersia dari generator sinkron [11].

Parameter berikutnya adalah frekuensi nadir, yaitu nilai frekuensi terendah yang dicapai sistem setelah gangguan sebelum frekuensi mulai pulih menuju kondisi stabil. Frekuensi nadir digunakan untuk menunjukkan tingkat keparahan penurunan frekuensi yang terjadi akibat ketidakseimbangan daya. Secara matematis, frekuensi nadir dapat dinyatakan sebagai nilai frekuensi minimum yang dicapai sistem setelah gangguan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$f_{nadir} = \min (f(t)) \quad 3)$$

dengan $f(t)$ merupakan frekuensi sistem sebagai fungsi waktu setelah gangguan terjadi. Parameter ini digunakan untuk menentukan tingkat keparahan penurunan frekuensi dan mengevaluasi apakah sistem masih berada dalam batas operasi yang diizinkan. Semakin rendah nilai frekuensi nadir, semakin besar risiko sistem mengalami pelanggaran batas operasi

frekuensi maupun aktivasi skema pelepasan beban otomatis. Integrasi PLTS memengaruhi karakteristik kestabilan frekuensi sistem sehingga evaluasi frekuensi nadir menjadi penting dalam menilai keamanan operasi sistem tenaga listrik [5].

Selain nilai frekuensi nadir, waktu nadir (*time to nadir*) juga digunakan sebagai parameter untuk mengevaluasi karakteristik respons frekuensi sistem. Waktu nadir merupakan waktu yang dibutuhkan frekuensi sistem untuk mencapai nilai minimum setelah gangguan terjadi. Parameter ini menggambarkan kecepatan respons awal sistem terhadap ketidakseimbangan daya dan sering digunakan bersama frekuensi nadir untuk menilai tingkat keparahan gangguan serta kemampuan sistem dalam merespons perubahan kondisi operasi. Semakin singkat waktu nadir, semakin cepat frekuensi mencapai nilai minimum setelah gangguan terjadi [18].

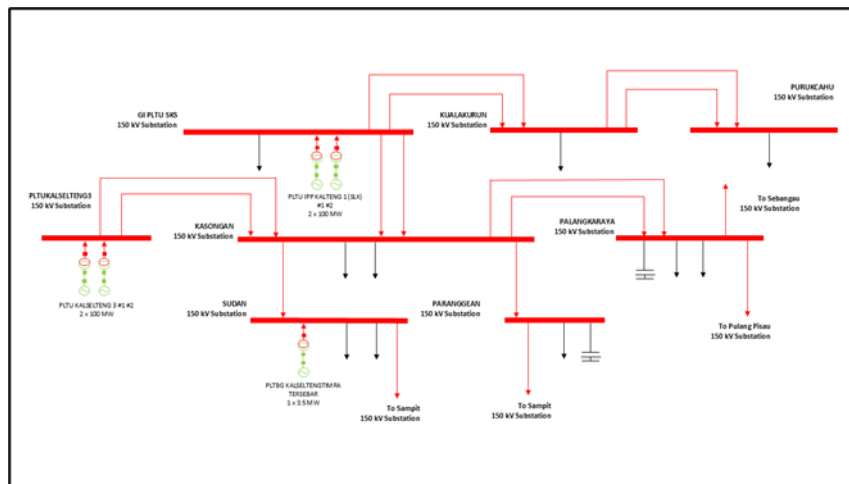
Karakteristik respons frekuensi juga dapat dievaluasi menggunakan waktu pemulihan frekuensi (*frequency recovery time*). Parameter ini menunjukkan waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali menuju kondisi operasi yang stabil setelah gangguan terjadi. Waktu pemulihan yang lebih singkat menunjukkan kemampuan sistem yang lebih baik dalam mengembalikan keseimbangan antara pembangkitan dan beban. Waktu penyelesaian (*settling time*) digunakan bersama parameter *RoCoF* dan deviasi frekuensi untuk mengevaluasi stabilitas frekuensi sistem setelah integrasi pembangkit energi terbarukan [6].

Parameter *RoCoF*, frekuensi nadir, waktu nadir, dan waktu pemulihan frekuensi merupakan indikator yang umum digunakan untuk mengevaluasi karakteristik respons frekuensi sistem setelah gangguan pada studi integrasi energi terbarukan [6]. Oleh karena itu, ketiga parameter tersebut digunakan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi pengaruh integrasi PLTS Kalimantan Tengah terhadap respons frekuensi sistem pada berbagai tingkat penetrasi PLTS.

B. METODE PENELITIAN

Sistem Kelistrikan dan Data Penelitian

Penelitian ini menggunakan sistem kelistrikan Kalimantan Tengah yang ditunjukkan pada Gambar 2. Sistem tersebut disuplai oleh 14 unit pembangkit dengan total kapasitas pembangkitan sistem sebesar 902,096 MW. Pembangkit dengan kapasitas terbesar adalah PLTU IPP Kalteng-1 dengan kapasitas 100 MW. Dari sisi jaringan transmisi, sistem Kalimantan Tengah terdiri atas 49 Gardu Induk (GI) 150 kV yang saling terhubung antar sistem interkoneksi.

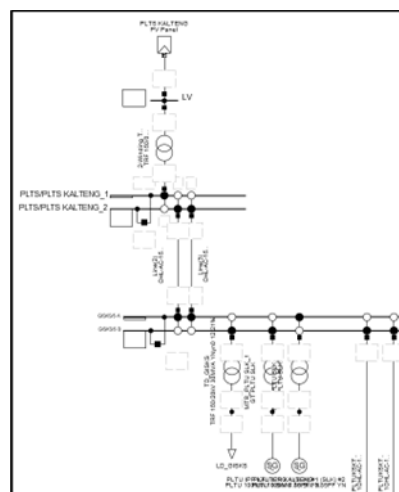


Gambar 2. Single Line Diagram Sistem 150 kV Kalimantan Tengah (Disederhanakan)

Dalam penelitian ini, PLTS tersebut dimodelkan dengan kapasitas 126 MWac pada sisi interkoneksi ke sistem transmisi 150 kV. Perbedaan antara kapasitas MWp dan MWac disebabkan oleh konversi daya dari sisi DC modul fotovoltaik ke sisi AC keluaran inverter, sehingga kapasitas AC yang dapat disalurkan ke jaringan lebih rendah dibandingkan kapasitas puncak DC terpasang.

Kapasitas PLTS Kalimantan Tengah yang direncanakan memiliki kapasitas sebesar 126 MWac. Gambar 3 lokasi integrasi PLTS terhubung ke GI PLTU SKS 150 kV dengan jarak saluran transmisi 10 km, sehingga memungkinkan integrasi pembangkit energi terbarukan skala besar ke jaringan utama.

Gambar 3. Lokasi Integrasi PLTS Kalimantan Tengah



Skenario Simulasi

Pada penelitian ini dilakukan simulasi dua skenario simulasi untuk mengevaluasi dampak integrasi PLTS Kalimantan Tengah terhadap respon sistem kelistrikan Kalimantan Tengah. Dua

skenario tersebut adalah:

1. Skenario Pelepasan PLTS Pada Berbagai Tingkat Penetrasi

Penetrasi dalam skenario ini dinyatakan dalam daya yang di injeksi ke dalam sistem. Penetrasi ditentukan sebesar 25%, 50%, 75%, 100% dari kapasitas PLTS yang diintegrasikan sebesar 126 MW. Pada tiap penetrasi, PLTS dilepaskan dari sistem sebagai gangguan untuk menganalisis pengaruh peningkatan PLTS terhadap respon frekuensi system.

2. Skenario Pelepasan Generator Terbesar

Skenario ini bertujuan untuk mengamati respon frekuensi akibat pelepasan generator terbesar dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah integrasi PLTS. Pada skenario pelepasan generator, gangguan diberikan pada detik ke-5 dengan melepaskan unit PLTU IPP Kalteng-1 yang merupakan generator dengan kapasitas terbesar pada sistem.

Simulasi RMS Menggunakan DiGSILENT PowerFactory

Simulasi dijalankan menggunakan perangkat lunak DiGSILENT PowerFactory dengan pendekatan Root Mean Square (RMS) untuk menilai dampak integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya terhadap kestabilan frekuensi sistem. Data hasil simulasi diperoleh dari kurva frekuensi direkam pada titik pengamatan yang telah ditentukan, kemudian dilakukan analisis parameter frekuensi yang meliputi frekuensi nadir sebagai nilai minimum frekuensi setelah gangguan, laju perubahan frekuensi (Rate of Change of Frequency/RoCoF) yang menunjukkan kecepatan perubahan frekuensi pada periode awal gangguan, serta karakteristik pemulihan frekuensi menuju kondisi operasi yang baru.

Kriteria Evaluasi Sistem

Hasil simulasi pada penelitian ini dievaluasi berdasarkan batas operasi sistem tenaga listrik yang mengacu pada Grid Code Kalimantan yang ditunjukkan pada Gambar 4.

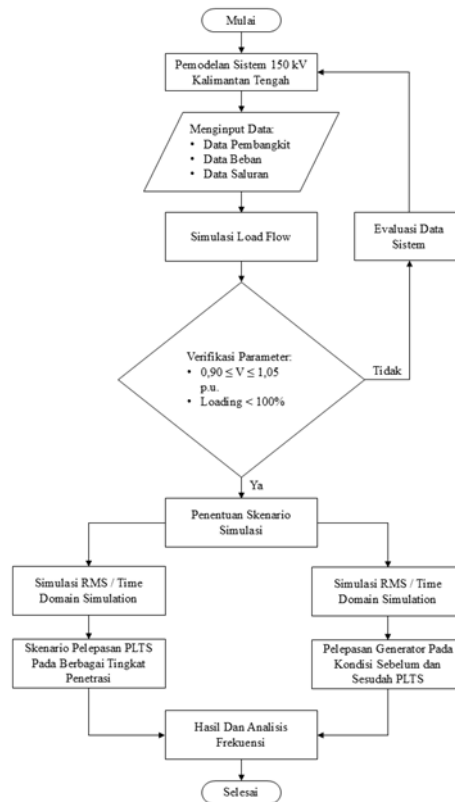
D. Karakteristik Unjuk Kerja Jaringan									
1. PLN Wilayah dan semua Pelaku Usaha/Pemakai Jaringan harus berusaha semaksimal mungkin agar pada setiap titik sambungan, unjuk kerja berikut ini dipenuhi, yaitu:									
a.	frekuensi nominal 50 Hz, diusahakan untuk tidak lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih tinggi dari 50,5 Hz, dan selama waktu keadaan darurat (<i>emergency</i>) dan gangguan, frekuensi sistem diizinkan turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52,0 Hz sebelum unit pembangkit diizinkan keluar dari operasi;								
b.	tegangan sistem harus dipertahankan dalam batasan sebagai berikut:								
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Tegangan Nominal</th> <th>Kondisi Normal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>275 kV</td> <td>+5%, -10%</td> </tr> <tr> <td>150 kV</td> <td>+5%, -10%</td> </tr> <tr> <td>66 kV</td> <td>+5%, -10%</td> </tr> </tbody> </table>	Tegangan Nominal	Kondisi Normal	275 kV	+5%, -10%	150 kV	+5%, -10%	66 kV	+5%, -10%
Tegangan Nominal	Kondisi Normal								
275 kV	+5%, -10%								
150 kV	+5%, -10%								
66 kV	+5%, -10%								

Gambar 4. Kriteria Batas Operasi Sistem Kalimantan Tengah

Parameter yang digunakan sebagai kriteria evaluasi meliputi tegangan bus, pembebanan saluran transmisi, dan frekuensi sistem. Kriteria tersebut digunakan untuk memastikan bahwa

sistem tetap beroperasi dalam kondisi yang aman dan andal setelah integrasi PLTS maupun ketika terjadi gangguan pada sistem.

Flowchart Penelitian



Gambar 5. Flowchart Penelitian

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

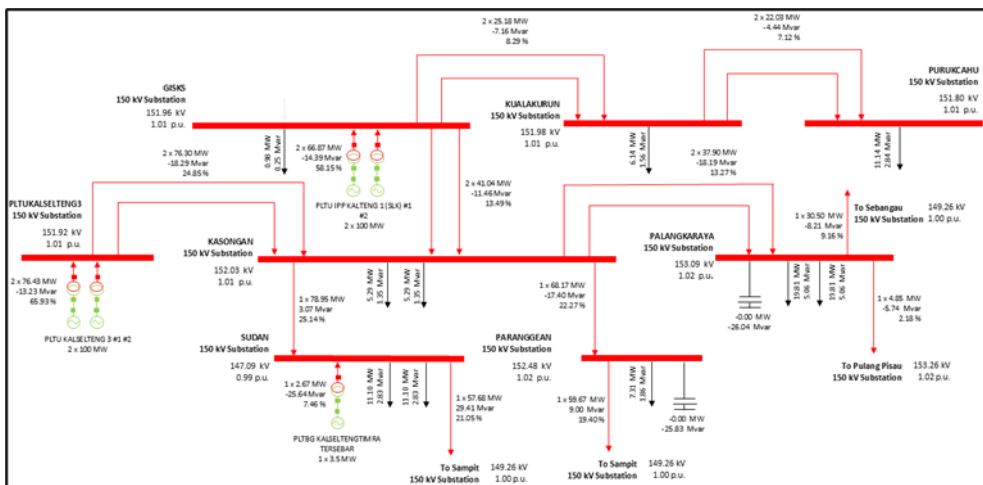
Kondisi Dasar Sistem

Secara keseluruhan semua bus tetap berada dalam kisaran yang dapat diterima yaitu 0,99–1,01 p.u., yang menunjukkan bahwa semua tingkat tegangan gardu induk di dekat titik integrasi PLTS Kalimantan Tengah berada dalam kisaran operasi yang aman, artinya tidak ada pelanggaran batas tegangan berdasarkan Grid Code [19].

Dari sisi pembebanan saluran, nilai loading tertinggi sebesar 25,14% menunjukkan bahwa sistem masih memiliki margin kapasitas transmisi yang cukup besar. Rendahnya tingkat pembebanan tersebut mengindikasikan bahwa integrasi PLTS Kalimantan Tengah belum menimbulkan potensi kongesti pada jaringan transmisi di sekitar titik interkoneksi. Dengan demikian, analisis pada penelitian ini dapat difokuskan pada aspek respons frekuensi tanpa dipengaruhi oleh keterbatasan kapasitas saluran transmisi.

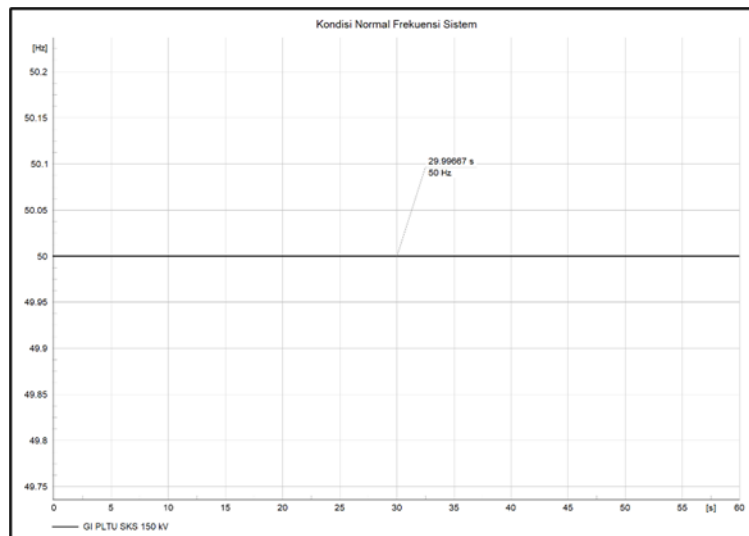
Kemudian untuk loading saluran tertinggi di dekat PLTS Kalimantan Tengah berada di saluran GI Kasongan 150 kV menuju GI Sudan 150 kV sebesar 25,14 % namun nilai tersebut masih dalam kisaran operasi yang aman, tanpa pelanggaran batas loading saluran berdasarkan Grid Code [19].

Hasil simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 5 menunjukkan bahwa sistem masih memiliki profil tegangan yang baik sebelum integrasi PLTS dilakukan. Tidak ditemukannya pelanggaran batas tegangan mengindikasikan bahwa jaringan transmisi 150 kV Kalimantan Tengah memiliki kemampuan yang memadai untuk mengakomodasi integrasi PLTS pada kondisi operasi normal.



Gambar 6. Kondisi Dasar Jaringan Tegangan dan Loading Saluran

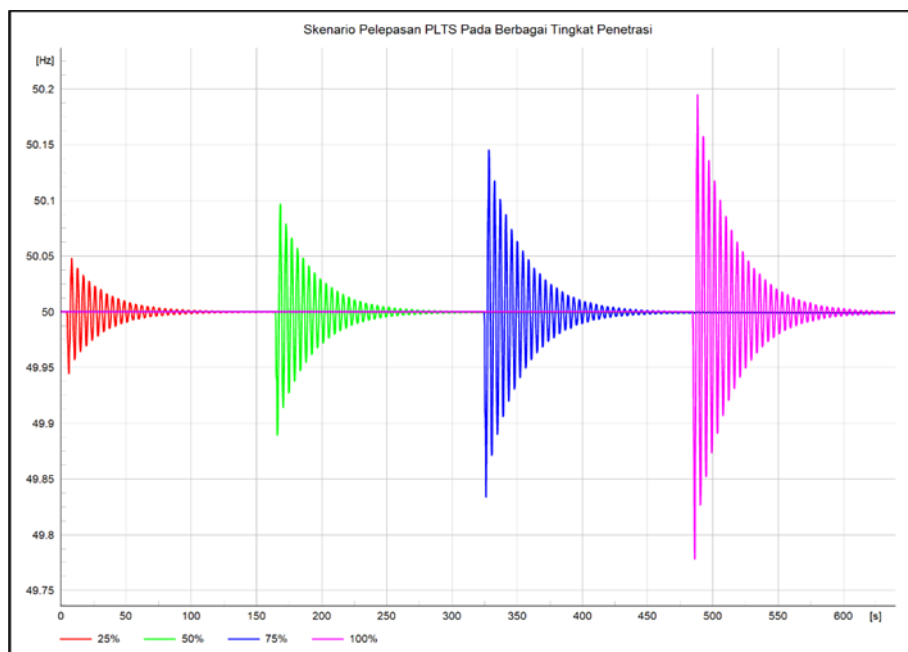
Selain itu frekuensi dapat dilihat pada Gambar 6, menunjukkan bahwa frekuensi berada pada kondisi normal dengan nominal 50 Hz. Kondisi ini selanjutnya digunakan sebagai kondisi awal untuk mengevaluasi respon frekuensi akibat integrasi PLTS Kalimantan Tengah. Kondisi steady-state yang memenuhi batas operasi tegangan, pembebanan saluran, dan frekuensi diperlukan untuk memastikan bahwa respons frekuensi yang diamati pada skenario simulasi berikutnya benar-benar disebabkan oleh gangguan yang diberikan, bukan akibat kondisi operasi awal sistem yang tidak stabil.



Gambar 7. Kondisi Dasar Jaringan Frekuensi

Skenario Pelepasan PLTS Pada Berbagai Tingkat Penetrasi

Gambar 8 menunjukkan respons frekuensi sistem pada berbagai tingkat penetrasi PLTS, yaitu 25%, 50%, 75%, dan 100% dari kapasitas PLTS terpasang. Skenario ini digunakan untuk mengevaluasi pengaruh tingkat penetrasi PLTS terhadap karakteristik respons frekuensi sistem akibat gangguan pelepasan PLTS. Nilai karakteristik respons frekuensi untuk masing-masing tingkat penetrasi PLTS dirangkum pada Tabel 2.



Gambar 8. Grafik Frekuensi Pelepasan PLTS Berbagai Tingkat Penetrasi

Tabel 2. Nilai Karakteristik Frekuensi Pelepasan PLTS

Penetrasi (%)	Injeksi (MW)	Frekuensi Nadir (Hz)	Waktu Nadir (detik)	RoCoF (Hz/detik)	Waktu Pemulihan (detik)
---------------	--------------	----------------------	---------------------	------------------	-------------------------

25	31,5	49,944	1,142	0,530	2,162
50	63	49,889	1,132	1,066	2,187
75	94,5	49,834	1,132	1,607	2,192
100	126	49,778	1,132	2,154	2,212

Berdasarkan Tabel 2, peningkatan penetrasi PLTS menyebabkan penurunan frekuensi nadir dan peningkatan nilai RoCoF. Frekuensi nadir menurun dari 49,944 Hz pada penetrasi 25% menjadi 49,778 Hz pada penetrasi 100%, sedangkan RoCoF meningkat dari 0,530 Hz/detik menjadi 2,154 Hz/detik.

Penurunan frekuensi nadir menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas PLTS yang dilepaskan dapat menyebabkan ketidakseimbangan daya aktif yang semakin besar pada sistem. Ketika PLTS terlepas dari jaringan, daya yang sebelumnya disuplai PLTS harus segera digantikan oleh pembangkit lain yang masih beroperasi sehingga frekuensi sistem mengalami penurunan. Semakin besar kapasitas PLTS yang hilang, semakin besar deviasi frekuensi yang terjadi dan menyebabkan frekuensi nadir menjadi lebih rendah. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi pembangkit berbasis inverter dapat memperdalam penurunan frekuensi minimum setelah gangguan terjadi akibat berkurangnya kontribusi inersia sistem [13], [17].

Nilai RoCoF meningkat secara signifikan dari 0,530 Hz/detik pada penetrasi 25% menjadi 2,154 Hz/detik pada penetrasi 100%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa frekuensi berubah lebih cepat setelah gangguan terjadi seiring bertambahnya kontribusi PLTS dalam sistem. Kondisi ini terjadi karena kehilangan daya aktif akibat pelepasan PLTS menjadi semakin besar sehingga laju perubahan frekuensi meningkat. Tren peningkatan RoCoF pada penelitian ini sejalan dengan hasil penelitian pada sistem Bali dan Sulawesi Bagian Selatan yang menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi pembangkit energi terbarukan menyebabkan sistem menjadi lebih sensitif terhadap gangguan frekuensi [4], [7].

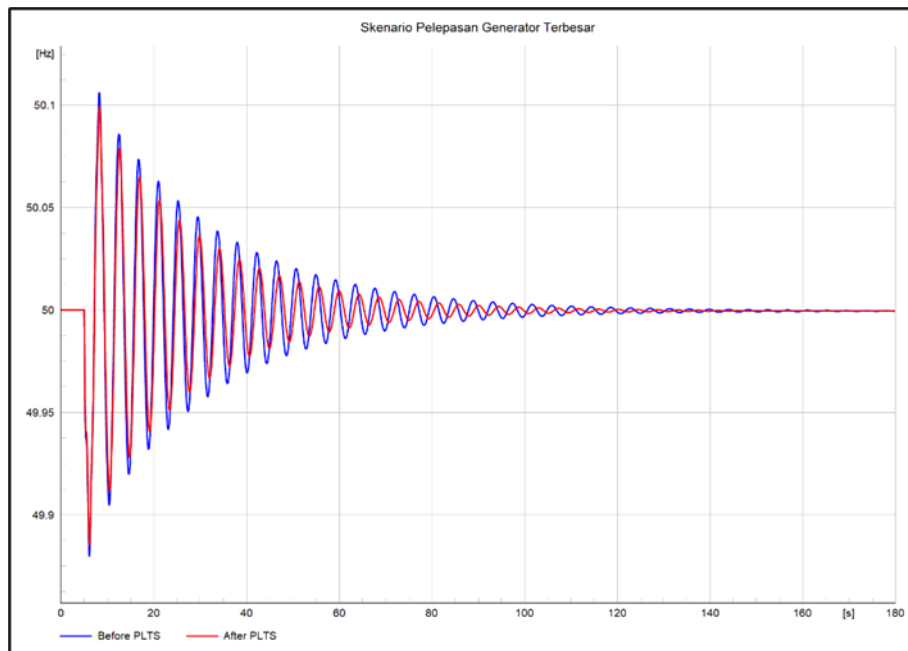
Waktu nadir berada pada rentang 1,132–1,142 detik dan tidak menunjukkan perubahan yang signifikan pada seluruh tingkat penetrasi PLTS. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS lebih memengaruhi besarnya deviasi frekuensi dibandingkan waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai titik frekuensi minimum. Karakteristik serupa juga ditemukan pada studi integrasi PLTS pada sistem tenaga listrik lainnya, di mana perubahan penetrasi energi terbarukan lebih dominan memengaruhi frekuensi nadir dan RoCoF dibandingkan waktu tercapainya frekuensi minimum [5], [6].

Waktu pemulihan frekuensi mengalami peningkatan yang relatif kecil dari 2,162 detik menjadi 2,212 detik seiring meningkatnya penetrasi PLTS. Meskipun terjadi peningkatan deviasi frekuensi akibat pelepasan PLTS, sistem masih mampu mengembalikan frekuensi menuju kondisi stabil dalam rentang waktu yang relatif serupa. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pengaturan primer pada sistem masih dapat merespons gangguan dengan baik pada seluruh tingkat penetrasi yang diuji. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa integrasi PLTS tidak selalu menyebabkan perubahan signifikan terhadap karakteristik pemulihan frekuensi apabila kapasitas pembangkit sinkron yang tersisa masih memadai untuk menopang sistem [4], [9], [13].

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS menyebabkan karakteristik respons frekuensi sistem menjadi lebih sensitif terhadap gangguan. Hal ini ditunjukkan oleh tren penurunan frekuensi nadir, peningkatan RoCoF, serta sedikit peningkatan waktu pemulihan frekuensi seiring bertambahnya kapasitas PLTS yang diintegrasikan. Meskipun demikian, seluruh nilai frekuensi nadir yang diperoleh masih berada di atas batas operasi minimum sistem sehingga integrasi PLTS hingga kapasitas 126 MW masih dapat diakomodasi oleh sistem 150 kV Kalimantan Tengah pada skenario pelepasan PLTS yang dianalisis [19].

Skenario Pelepasan Generator Terbesar

Gambar 9 menunjukkan respons frekuensi sistem akibat pelepasan generator terbesar pada kondisi sebelum dan sesudah integrasi PLTS. Skenario ini digunakan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik respons frekuensi sistem akibat lepasnya generator PLTU IPP Kalteng-1 dengan kapasitas 100 MW sebelum dan sesudah integrasi PLTS. Ringkasan nilai karakteristik respons frekuensi untuk kedua kondisi disajikan pada Tabel 1.



Gambar 9. Grafik Frekuensi Pelepasan Generator Terbesar

Tabel 3. Nilai Karakteristik Frekuensi Lepas Generator Terbesar

Kondisi	Frekuensi Nadir (Hz)	Waktu Nadir (detik)	RoCoF (Hz/detik)	Waktu Pemulihan (detik)
Sebelum PLTS	49.880	6.092	1.199	2.112
Sesudah PLTS	49.885	6.102	1.257	2.152

Berdasarkan Tabel 3, frekuensi nadir mengalami peningkatan dari 49,880 Hz pada kondisi sebelum integrasi PLTS menjadi 49,885 Hz setelah integrasi PLTS. Meskipun peningkatan yang terjadi relatif kecil, hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi PLTS 126 MW tidak menyebabkan penurunan kemampuan sistem dalam mempertahankan frekuensi minimum setelah pelepasan generator terbesar. Nilai frekuensi nadir yang diperoleh masih berada dalam batas operasi yang diperbolehkan sehingga sistem tetap mampu mempertahankan stabilitas frekuensi setelah gangguan terjadi. Hasil ini sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa integrasi energi terbarukan tidak selalu menyebabkan penurunan frekuensi nadir apabila sistem masih memiliki cadangan pembangkitan dan dukungan frekuensi yang memadai [13].

Nilai RoCoF meningkat dari 1,199 Hz/detik menjadi 1,257 Hz/detik setelah integrasi PLTS. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa laju perubahan frekuensi awal setelah pelepasan generator menjadi lebih cepat dibandingkan kondisi sebelum integrasi PLTS. Kondisi ini dapat dikaitkan dengan meningkatnya porsi pembangkit berbasis inverter dalam sistem yang tidak menyediakan inersia alami sebagaimana generator sinkron. Temuan ini

konsisten dengan berbagai penelitian yang menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi pembangkit energi terbarukan cenderung meningkatkan nilai RoCoF akibat berkurangnya kontribusi inersia sistem [4], [7].

Waktu nadir hanya berubah dari 6,092 detik menjadi 6,102 detik, sedangkan waktu pemulihan frekuensi meningkat dari 2,112 detik menjadi 2,152 detik. Perubahan yang relatif kecil tersebut menunjukkan bahwa integrasi PLTS belum memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik dinamis sistem setelah pelepasan generator terbesar. Sistem masih mampu mencapai titik frekuensi minimum dan kembali menuju kondisi operasi stabil dalam rentang waktu yang hampir sama dengan kondisi sebelum integrasi PLTS. Hasil ini mengindikasikan bahwa kapasitas pembangkit sinkron yang masih beroperasi mampu mempertahankan kemampuan pemulihan frekuensi sistem setelah gangguan terjadi [5]. Meskipun nilai RoCoF meningkat setelah integrasi PLTS, frekuensi nadir tidak mengalami penurunan dan justru menunjukkan perbaikan yang relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan laju perubahan frekuensi pada periode awal gangguan tidak selalu diikuti oleh penurunan frekuensi minimum yang lebih besar. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sistem masih memiliki kemampuan yang memadai dalam menyediakan cadangan daya dan mempertahankan keseimbangan daya setelah fase transien awal gangguan.

Secara keseluruhan, integrasi PLTS 126 MW pada sistem 150 kV Kalimantan Tengah menyebabkan peningkatan nilai RoCoF, namun tidak memberikan perubahan signifikan terhadap frekuensi nadir maupun waktu pemulihan frekuensi. Hasil ini menunjukkan bahwa penetrasi PLTS yang direncanakan masih dapat diakomodasi oleh sistem tanpa menimbulkan degradasi kinerja respons frekuensi yang berarti pada skenario pelepasan generator terbesar. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian pada sistem Bali dan Lombok yang menunjukkan bahwa dampak integrasi PLTS terhadap stabilitas frekuensi sangat dipengaruhi oleh tingkat penetrasi PLTS, kapasitas pembangkitan sinkron yang tersisa, serta karakteristik jaringan yang digunakan [5], [6].

Dari hasil simulasi dapat disimpulkan bahwa integrasi PLTS Kalimantan Tengah berkapasitas 126 MW belum menyebabkan perubahan signifikan terhadap karakteristik respons frekuensi sistem ketika terjadi pelepasan generator terbesar. Meskipun nilai RoCoF meningkat, seluruh parameter frekuensi yang diamati masih berada dalam batas operasi yang dapat diterima sehingga sistem dinilai masih memiliki kemampuan yang memadai dalam mempertahankan stabilitas frekuensi pada kondisi gangguan yang dianalisis.

D. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi RMS menggunakan DigSILENT PowerFactory pada sistem 150 kV Kalimantan Tengah, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a. Integrasi PLTS Kalimantan Tengah berkapasitas 126 MW memengaruhi karakteristik respons frekuensi sistem, terutama pada parameter frekuensi nadir dan *Rate of Change of Frequency (RoCoF)*.
- b. Pada skenario pelepasan PLTS, peningkatan penetrasi PLTS dari 25% hingga 100% menyebabkan frekuensi nadir menurun dari 49,944 Hz menjadi 49,778 Hz dan nilai *RoCoF* meningkat dari 0,530 Hz/detik menjadi 2,154 Hz/detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS menyebabkan sistem menjadi lebih sensitif terhadap gangguan akibat berkurangnya kontribusi inersia sistem.
- c. Waktu nadir berada pada rentang 1,132–1,142 detik dan tidak mengalami perubahan yang signifikan, sedangkan waktu pemulihan frekuensi meningkat secara relatif kecil dari 2,162 detik menjadi 2,212 detik. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi PLTS lebih memengaruhi besarnya deviasi frekuensi dibandingkan karakteristik pemulihan frekuensi sistem.
- d. Pada skenario pelepasan generator terbesar, integrasi PLTS menyebabkan nilai *RoCoF* meningkat dari 1,199 Hz/detik menjadi 1,257 Hz/detik. Namun demikian, frekuensi nadir, waktu nadir, dan waktu pemulihan frekuensi tidak mengalami perubahan yang signifikan sehingga sistem masih mampu mempertahankan stabilitas frekuensi setelah gangguan terjadi.
- e. Secara keseluruhan, integrasi PLTS Kalimantan Tengah berkapasitas 126 MW masih dapat diakomodasi oleh sistem 150 kV Kalimantan Tengah tanpa menyebabkan degradasi signifikan terhadap kinerja respons frekuensi. Seluruh parameter frekuensi yang diamati masih berada dalam batas operasi yang diperbolehkan berdasarkan *Grid Code* Kalimantan.

Penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada evaluasi penetrasi PLTS yang lebih tinggi serta kajian penerapan teknologi pendukung seperti *Battery Energy Storage System (BESS)*, *grid-forming inverter*, maupun *synthetic inertia* untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam mempertahankan stabilitas frekuensi pada sistem dengan penetrasi energi terbarukan yang lebih besar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

E. DAFTAR PUSTAKA

- [1] PT PLN (Persero), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2025–2034," 2025. [Online]. Available: https://gatrik.esdm.go.id/frontend/download_index/?kode_category=ruptl_pln
- [2] W. Li, H. Wang, and Y. Jia, "Frequency Control Strategy of Grid-connected PV System Using Virtual Synchronous Generator," 2019 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia (ISGT Asia), pp. 1618–1622, 2019.
- [3] K. Máslo, "Impact of Photovoltaics on Frequency Stability of Power System During Solar Eclipse," IEEE Trans. POWER Syst. Impact, vol. 31, no. 5, 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2015.2490245.
- [4] A. E. Saputra, A. U. Krismanto, and A. Lomi, "ANALISIS PENGARUH INTEGRASI PEMBANGKIT ENERGI BARU TERBARUKAN TERHADAP KESTABILAN FREKUENSI PADA SALURAN TRANSMISI 150KV BALI," Magnetika, vol. 7, no. 2, 2023, [Online]. Available: <https://www.ejournal.itn.ac.id/magnetika/article/view/8610>
- [5] Y. Latumahina, A. Lomi, and A. U. Krismanto, "ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI AKIBAT SISTEM KELISTRIKAN LOMBOK," Magnetika, vol. 07, pp. 351–356, 2023, [Online]. Available: <https://www.ejournal.itn.ac.id/index.php/magnetika/article/view/8629>
- [6] V. D. Krisnaputra, A. Lomi, and I. B. Sulistiawati, "ANALISA KESTABILAN FREKUENSI AKIBAT INTEGRASI PLTS 100 MW PADA SISTEM TENAGA LISTRIK 150 KV," Semin. Nas. Fortei Reg. 7, vol. 7, pp. 314–323, 2025, [Online]. Available: <https://journal.fortei7.org/index.php/sinarFe7/article/view/757>
- [7] R. Wahyu et al., "ANALISIS INTEGRASI PLTB PADA STABILITAS FREKUENSI DALAM JARINGAN KELISTRIKAN SULBAGSEL BERDASARKAN RATE OF CHANGE OF FREQUENCY," ElektriKA, vol. 16, no. 2, pp. 84–92, 2024, doi: 10.26623/elektriKA.v16i2.10342.
- [8] N. Hatziargyriou et al., "Definition and Classification of Power System Stability – Revisited & Extended," IEEE Trans. Power Syst., vol. 36, no. 4, pp. 3271–3281, 2021, doi: 10.1109/TPWRS.2020.3041774.
- [9] A. Hassan, J. Ahmed, S. Papadopoulos, F. Kahwash, and K. Goh, "A comprehensive review of frequency response and control strategies for grid-connected solar photovoltaic

- systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 226, no. PC, p. 116324, 2026, doi: 10.1016/j.rser.2025.116324.
- [10] A. P. Darmayanto, “ANALISIS KESTABILAN FREKUENSI SISTEM SULAWESI BAGIAN SELATAN AKIBAT LEPASNYA SALAH SATU PUSAT PEMBANGKIT,” Universitas Hasanuddin, 2021. [Online]. Available: https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/7401/4/D41116512_skripsi.pdf
- [11] F. Gonzalez-longatt, J. M. Roldan-fernandez, H. R. Chamorro, S. Arnaltes, and J. L. Rodriguez-amenedo, “Investigation of Inertia Response and Rate of Change of Frequency in Low Rotational Inertial Scenario of Synchronous Dominated System,” *Electronics*, vol. 10, no. 2288, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics10182288>.
- [12] M. W. Qaisar and J. Fang, “Grid-Forming Converters for Renewable Generation : A Comprehensive Review,” *Energies*, vol. 18, no. 4565, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/en18174565>.
- [13] C. Chang and F. Lin, “Photovoltaic-System Participation in Power-System Frequency Response under High Renewable Energy Penetration,” *Int. J. Power Syst.*, vol. 9, 2024, [Online]. Available: <https://www.iasos.org/home/caijps/photovoltaic-system-participation-in-power-system-frequency-response-under-high-renewable-energy-penetration>
- [14] P. Di Leo, G. Malgaroli, F. Spertino, and A. Ciocia, “Renewable Energy Integration in Emerging Electricity Grids : Technologies , Challenges , and System-Level Perspectives,” *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 5124, 2026, doi: <https://doi.org/10.3390/app16105124>.
- [15] H. M. Sultan, A. A. Z. Diab, O. N. Kuznetsov, Z. M. Ali, and O. Abdalla, “Evaluation of the Impact of High Penetration Levels of PV Power Plants on the Capacity , Frequency and Voltage Stability of Egypt ’ s Unified Grid,” *Energies*, vol. 12, no. 552, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12030552>.
- [16] R. Darussalam and I. Garniwa, “The Effect of Photovoltaic Penetration on Frequency Response of Distribution System,” 2018 *Int. Conf. Sustain. Energy Eng. Appl.*, pp. 81–85, 2018.
- [17] B. Çavdar and Ö. Akyazi, “Effect of PV Plant on Frequency Stability in IEEE12 Bus System for Different Penetration Levels and Depth of Frequency Support,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 49, pp. 15899–15916, 2024, doi: 10.1007/s13369-024-08733-z.
- [18] M. S. Ariwibowo, P. Negeri, and U. Pandang, “ANALISIS PENGARUH PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA TERHADAP KESTABILAN SISTEM KELISTRIKAN KEPULAUAN

SANGIHE,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 13, no. 3, 2025.

- [19] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, “PERATURAN MENTERI ENERGI DAN SUMBER DAYA MINERAL REPUBLIK INDONESIA - GRID CODE KALIMANTAN,” 2016. [Online]. Available: <https://peraturan.go.id/>