

INTEGRASI ENERGI TERBARUKAN PADA SISTEM KELISTRIKAN BALI 150 KV, 20-BUS

I Gede Mantra¹, I Made Wartana², ³ Irrine Budi Sulistiawati
Teknik Elektro S1, Institut Teknologi Nasional, Malang,
Indonesia

[1mantraigede1@gmail.com](mailto:mantraigede1@gmail.com), [2m.wartana@lecturer.itn.ac.id](mailto:m.wartana@lecturer.itn.ac.id), [3irrine@lecturer.itn.ac.id](mailto:irrine@lecturer.itn.ac.id)

Abstract - Peningkatan kebutuhan energi listrik dan target pemanfaatan energi baru terbarukan mendorong integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) ke dalam sistem kelistrikan Bali 150 kV. Integrasi PLTS diharapkan mampu meningkatkan profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan transmisi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh integrasi PLTS terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem kelistrikan Bali 150 kV 20-bus menggunakan perangkat lunak DiGSILENT PowerFactory. Metode penelitian dilakukan melalui simulasi aliran daya (*load flow*) pada tiga kondisi operasi, yaitu kondisi dasar (*base case*), peningkatan beban sebesar 40%, dan integrasi empat PLTS masing-masing berkapasitas 25 MW. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan beban sebesar 40% menyebabkan rata-rata tegangan sistem menurun dari 1,007 p.u. menjadi 0,963 p.u., sehingga beberapa bus mengalami kondisi *undervoltage*, yaitu GI Pesanggaran, Pecatu, dan Pemecutan. Setelah dilakukan integrasi empat PLTS berkapasitas 25 MW, rata-rata tegangan sistem meningkat menjadi 0,977 p.u. dan seluruh bus kembali berada di atas batas minimum operasi sebesar 0,95 p.u. Integrasi PLTS juga memberikan dampak positif terhadap rugi-rugi daya, yaitu menurunkan rugi-rugi daya aktif dari 28,40 MW menjadi 18,65 MW atau sebesar 34,33%, serta menurunkan rugi-rugi daya reaktif dari 98,75 MVAR menjadi 62,30 MVAR atau sebesar 36,91%. Penurunan rugi-rugi daya tersebut menunjukkan bahwa PLTS mampu menyuplai daya lebih dekat ke pusat beban sehingga mengurangi aliran daya pada saluran transmisi dan meningkatkan efisiensi penyaluran energi listrik. Berdasarkan hasil penelitian, integrasi PLTS terbukti mampu memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya, sehingga dapat menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan performansi dan keandalan sistem kelistrikan Bali 150 kV.

Keywords — Sistem Kelistrikan Bali 150 kV, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Profil Tegangan, Rugi-Rugi Daya, DiGSILENT PowerFactory.

Abstrak— The increasing demand for electrical energy and the target for the utilization of renewable energy have encouraged the integration of Solar Power Plants (PLTS) into the Bali 150 kV electrical power system. The integration of PLTS is expected to improve the voltage profile and reduce power losses in the transmission network. This study aims to analyze the effect of PLTS integration on the voltage profile and power losses of the 20-bus Bali 150 kV electrical power system using DiGSILENT PowerFactory software. The research method was carried out through *load flow* simulations under three operating conditions, namely the *base case*, a 40% load increase, and the integration of four PLTS units, each with a capacity of 25 MW. The simulation results show that a 40% increase in load caused the average system voltage to decrease from 1.007 p.u. to 0.963 p.u., resulting in *undervoltage* conditions at several buses, namely GI Pesanggaran, Pecatu, and Pemecutan. After the integration of four PLTS units with a capacity of 25 MW each, the average system voltage increased to 0.977 p.u., and all buses returned to values above the minimum operating limit of 0.95 p.u. The integration of PLTS also had a positive impact on power losses, reducing active power losses from 28.40 MW to 18.65 MW, representing a reduction of 34.33%, and reactive power losses from 98.75 MVAR to 62.30 MVAR, representing a reduction of 36.91%. This reduction in power losses indicates that PLTS can supply power closer to load centers, thereby reducing power flows through transmission lines and improving the efficiency of electrical energy transmission. Based on the research results, PLTS integration has proven to improve the voltage profile and reduce power losses, making it a potential solution for enhancing the performance and reliability of the Bali 150 kV electrical power system.

Kata Kunci— Bali 150 kV Power System, Solar Power Plant (SPP), Voltage Profile, Power Losses, DiGSILENT PowerFactory.

I. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi dan perkembangan ekonomi. Pemerintah Indonesia melalui Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) menargetkan peningkatan porsi Energi Baru dan Terbarukan (EBT) dalam bauran energi

nasional hingga mencapai 23%. Bali sebagai salah satu daerah yang memiliki komitmen terhadap pembangunan berkelanjutan diarahkan menjadi provinsi yang mandiri dan bersih energi melalui pemanfaatan sumber energi terbarukan, salah satunya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Integrasi PLTS ke dalam sistem kelistrikan diharapkan mampu memenuhi peningkatan kebutuhan energi sekaligus mendukung upaya pengurangan emisi karbon. Namun, integrasi PLTS juga menimbulkan tantangan terhadap sistem tenaga listrik, terutama yang berkaitan dengan profil tegangan dan rugi-rugi daya pada jaringan transmisi [1]. Salah satu aspek penting dalam menjamin kinerja sistem tenaga listrik adalah performansi sistem yang ditinjau dari kemampuan sistem mempertahankan profil tegangan dalam batas yang diizinkan serta meminimalkan rugi-rugi daya pada jaringan transmisi. Pada sistem kelistrikan Bali yang menggunakan jaringan transmisi 150 kV dan terdiri atas beberapa pusat pembangkitan serta pusat beban, kedua parameter tersebut menjadi indikator penting dalam menilai keandalan dan efisiensi operasi sistem [2]. Integrasi PLTS ke dalam jaringan transmisi 150 kV dapat memengaruhi pola aliran daya dan distribusi daya pada sistem. Karakteristik daya keluaran PLTS yang bergantung pada intensitas radiasi matahari menyebabkan perubahan injeksi daya ke jaringan. Apabila lokasi dan kapasitas PLTS tidak direncanakan dengan baik, kondisi tersebut dapat memengaruhi profil tegangan serta rugi-rugi daya pada sistem. Sebaliknya, penempatan PLTS yang tepat dapat memperbaiki profil tegangan sekaligus mengurangi rugi-rugi daya pada jaringan transmisi [3], [4]. Selain itu, perubahan aliran daya akibat integrasi PLTS dapat menyebabkan variasi tegangan pada beberapa bus dalam sistem. Oleh karena itu, diperlukan analisis untuk mengetahui sejauh mana integrasi PLTS mampu memperbaiki kondisi tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya. Hasil analisis tersebut diharapkan dapat menjadi acuan dalam menentukan kapasitas dan lokasi PLTS yang optimal pada sistem kelistrikan Bali [5].

Salah satu tantangan pengoperasian sistem tenaga listrik adalah menjaga tegangan dalam batas 0,95–1,05 p.u. atau sekitar 142,5–157,5 kV pada sistem 150 kV. Tegangan di luar batas tersebut dapat menurunkan kualitas penyaluran daya dan meningkatkan rugi-rugi daya [6], [7]. Integrasi PLTS sebagai *Distributed Generation* (DG) dapat menyuplai daya lebih dekat ke pusat beban sehingga berpotensi mengurangi jatuh tegangan dan rugi-rugi daya. Oleh karena itu, pengaruh integrasi PLTS terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya pada sistem Bali 150 kV perlu dianalisis [8], [9]. Penelitian ini menganalisis sistem aktual Bali 150 kV yang dimodelkan dalam 20 bus menggunakan DIgSILENT PowerFactory melalui simulasi *load flow*. Skenario yang digunakan meliputi kondisi dasar, peningkatan beban 40%, dan integrasi empat PLTS masing-masing 25 MW dengan total kapasitas 100 MW. Analisis dilakukan terhadap perubahan profil tegangan serta rugi-rugi daya aktif dan reaktif. Penggunaan sistem aktual Bali 150 kV 20-bus dengan kombinasi skenario peningkatan beban dan integrasi PLTS menjadi aspek kebaruan penelitian dalam mengevaluasi efektivitas PLTS terhadap perbaikan profil tegangan dan pengurangan rugi-rugi daya [10],[13].

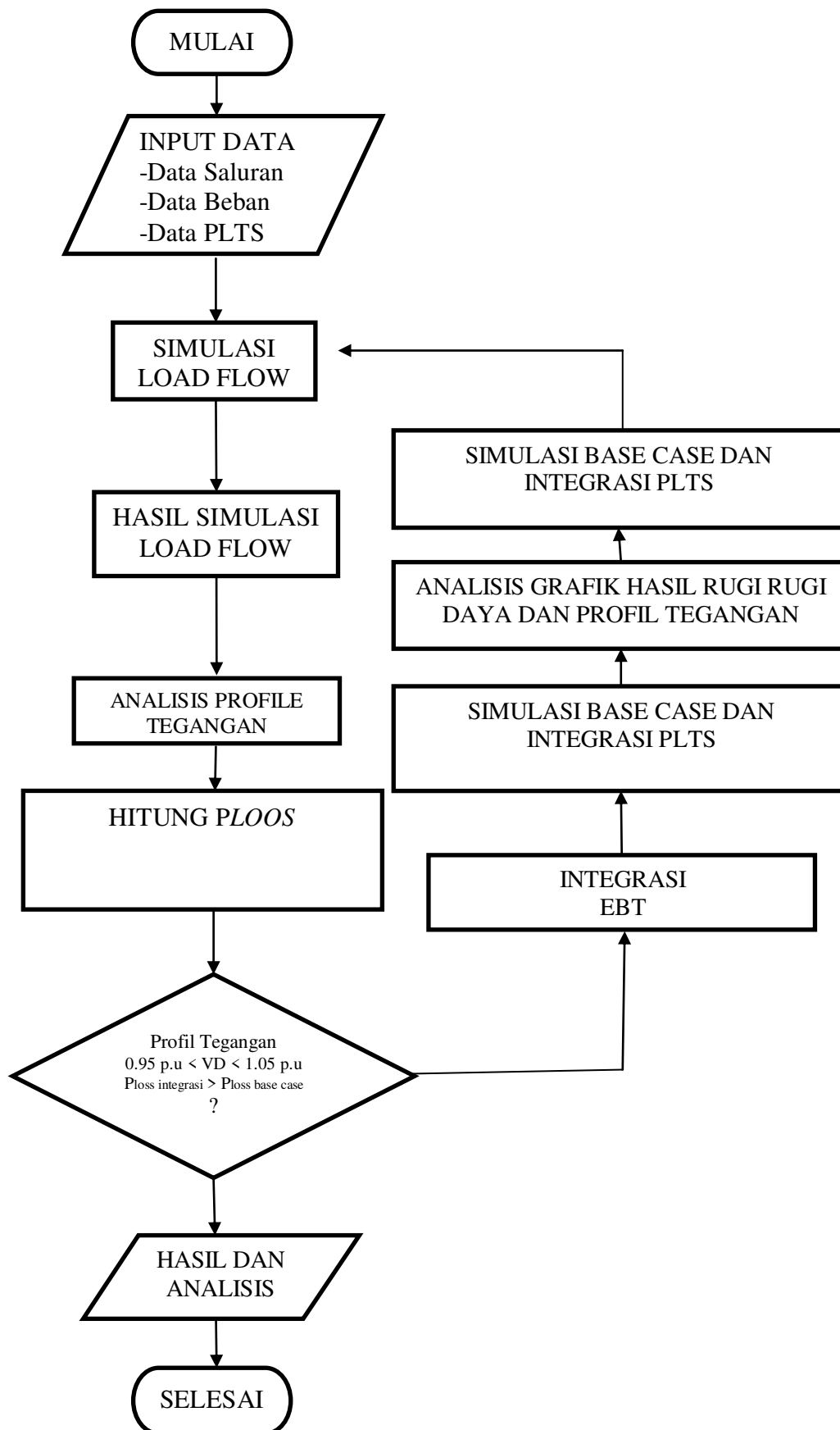
II. METODE PENELITIAN

A. Metode dan Spesifikasi Sistem

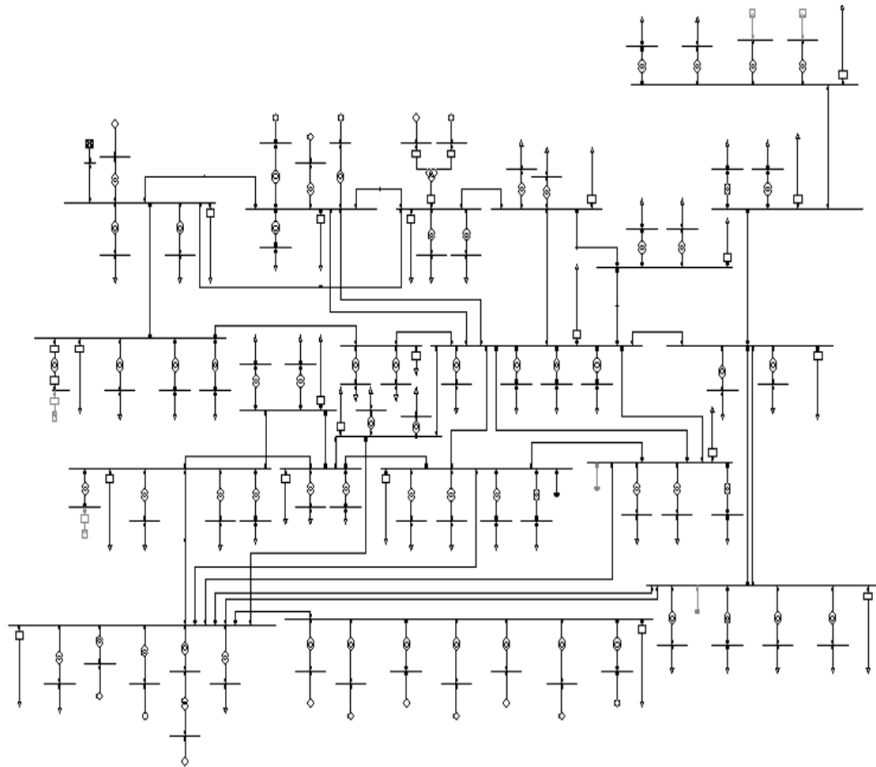
Penelitian ini menggunakan data sistem kelistrikan Bali 150 kV 20-bus yang diperoleh dari PT PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (UIP3B) Jawa, Madura, dan Bali – Unit Pelaksana Pengatur Beban (UP2B) Bali serta PT PLN (Persero) Unit Induk Distribusi (UID) Bali. Data yang digunakan meliputi data bus, pembangkit, transformator, saluran transmisi, dan beban yang menjadi dasar dalam pemodelan sistem pada perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Pengambilan data dilakukan pada tanggal 21–25 September 2025. DIgSILENT PowerFactory dipilih karena memiliki kemampuan yang baik dalam melakukan analisis sistem tenaga listrik, khususnya studi aliran daya (*load flow analysis*), sehingga mampu memberikan hasil simulasi yang akurat untuk mengevaluasi kondisi operasi sistem transmisi. Penelitian diawali dengan pemodelan sistem kelistrikan Bali 150 kV 20-bus sesuai dengan data aktual, kemudian dilakukan simulasi pada kondisi dasar (*base case*) untuk memperoleh kondisi awal sistem. Selanjutnya dilakukan peningkatan beban sebesar 40% untuk mengetahui pengaruh perubahan pembebanan terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya sistem. Setelah itu dilakukan penambahan empat unit PLTS dengan kapasitas masing-masing 25 MW pada bus yang telah ditentukan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap kondisi operasi sistem. Hasil simulasi pada setiap skenario kemudian dibandingkan berdasarkan perubahan profil tegangan pada setiap bus dan rugi-rugi daya sistem, sehingga dapat diketahui efektivitas penambahan PLTS dalam

meningkatkan kualitas operasi sistem kelistrikan Bali 150 kV 20-bus.

B. Flowchart Penelitian



C. SLD Sistem Kelistrikan Bali 150 KV pada software DIgSILENT



Gambar 2 SLD Sistem Kelistrikan Bali 150KV

Sistem kelistrikan pada penelitian ini dimodelkan sebagai sistem transmisi Bali 150 kV 20-bus menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory. Model sistem terdiri atas beberapa gardu induk, saluran transmisi 150 kV, transformator tenaga, generator konvensional, dan bus beban yang merepresentasikan kondisi sistem kelistrikan Bali. Salah satu generator ditetapkan sebagai *swing bus* untuk menjaga keseimbangan daya selama simulasi. Integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dilakukan pada beberapa bus yang telah ditentukan untuk menganalisis pengaruhnya terhadap performansi sistem. Analisis dilakukan melalui studi aliran daya (*load flow*) dengan parameter yang diamati meliputi profil tegangan pada setiap bus, aliran daya saluran, dan rugi-rugi daya pada sistem kelistrikan Bali 150 kV 20-bus.

D. Skenario Penelitian

Skenario simulasi pada penelitian ini terdiri atas tiga kondisi, yaitu Base Case, peningkatan beban sebesar 40%, dan integrasi PLTS sebesar 100 MW (4×25 MW). Base Case digunakan sebagai kondisi awal sistem tanpa integrasi PLTS. Selanjutnya, peningkatan beban 40% diterapkan untuk menganalisis pengaruh pertumbuhan beban terhadap profil tegangan dan rugi-rugi daya. Setelah itu, dilakukan integrasi PLTS 100 MW untuk mengevaluasi pengaruhnya dalam memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem kelistrikan Bali 150 kV

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perbandingan Hasil LoadFlow

Analisis perbandingan hasil *load flow* dilakukan melalui tiga skenario simulasi percobaan untuk mengevaluasi karakteristik dan kinerja sistem tenaga listrik. Case 1 ditetapkannya *base case* sebagai kondisi operasi acuan awal sistem. Selanjutnya, pada Case 2, dilakukan pengujian sensitivitas sistem terhadap penambahan beban dengan meningkatkan pembebanan pada seluruh *load bus* sebesar 40%. Terakhir, pada Case 3, simulasi menguji pemulihan dan peningkatan profil daya sistem melalui integrasi empat unit Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan kapasitas masing-masing sebesar 25 MW. Ketiga skenario ini dibandingkan secara komprehensif untuk menganalisis

dampaknya terhadap profil tegangan, rugi-rugi daya (*power losses*), dan tingkat pembebanan saluran pada jaringan.

a. Tabel case 1

Tabel 1 Case 1 (Keadaan awal atau base case)

DATA YANG DITELITI PADA JARINGAN BALI 20 BUS 150 kV (CASE 1)											
No	Bus/GI	P (MW)	Q (MVAR)	(p.u)	Resistansi R' (Ohm/km)	No	Bus/GI	P (MW)	Q (MVAR)	(p.u)	Resistansi R' (Ohm/km)
1	Gilimanuk	18	9	1,009	0,125	11	Sanur	90	44	1,007	0,095
2	Celukan Bawang	25	12	1,009	0,12	12	Pbian	110	52	1,008	0,094
3	Pemaron	42	20	1,009	0,12	13	Pklod	120	58	1,008	0,093
4	BTRTI	20	10	1,009	0,125	14	Bandara	75	35	1,007	0,092
5	Pygan	28	13	1,008	0,128	15	Nusa Dua	95	46	1,007	0,091
6	Amlapura	55	27	1,008	0,13	16	Pesanggaran	140	68	1,007	0,09
7	Negara	30	14	1,009	0,125	17	Pesanggaran	85	40	1,007	0,091
8	Asari (Antosari)	35	17	1,008	0,124	18	Kubu	24	11	1,006	0,132
9	Kapal	95	45	1,008	0,118	19	Pecatu	70	34	1,006	0,094
10	Gianyar	80	38	1,008	0,122	20	Pemecutan	115	55	1,006	0,093

Berdasarkan Tabel 1. (Case 1), kondisi awal (*base case*) sistem kelistrikan Bali 150 kV 20-bus menunjukkan bahwa sistem beroperasi secara normal dengan profil tegangan yang berada pada kisaran 1,006–1,009 p.u., sehingga masih memenuhi batas standar operasi. Beban aktif berkisar antara 18–140 MW dan beban reaktif 9–68 MVAR, dengan beban terbesar berada di GI Pesanggaran sebesar 140 MW. Sementara itu, nilai resistansi saluran berkisar 0,090–0,132 Ω /km, yang menunjukkan karakteristik jaringan transmisi yang beragam. Secara keseluruhan, kondisi ini menunjukkan sistem dalam keadaan stabil dan layak dijadikan sebagai base case untuk analisis pada skenario berikutnya.

b. Tabel Case 2

Tabel 2 Case 2 (Keadaan pada saat beban dinaikan (40 %))

DATA YANG DITELITI PADA JARINGAN BALI 20 BUS 150 kV (CASE 2)											
No	Bus/GI	P (MW)	Q (MVAR)	(p.u)	Resistansi R' (Ohm/km)	No	Bus/GI	P (MW)	Q (MVAR)	(p.u)	Resistansi R' (Ohm/km)
1	Gilimanuk	25,2	12,6	0,969	0,125	11	Sanur	126	61,6	0,967	0,095
2	Celukan Bawang	35	16,8	0,969	0,12	12	Pbian	154	72,8	0,968	0,094
3	Pemaron	58,8	28	0,969	0,12	13	Pklod	168	81,2	0,968	0,093
4	BTRTI	28	14	0,969	0,125	14	Bandara	105	49	0,967	0,092
5	Pygan	39,2	18,2	0,968	0,128	15	Nusa Dua	133	64,4	0,967	0,091
6	Amlapura	77	37,8	0,968	0,13	16	GIS Pesanggaran	196	95,2	0,967	0,09
7	Negara	42	19,6	0,969	0,125	17	GI Pesanggaran	119	56	0,949	0,091
8	Asari (Antosari)	49	23,8	0,968	0,124	18	Kubu	33,6	15,4	0,968	0,132
9	Kapal	133	63	0,968	0,118	19	Pecatu	98	47,6	0,942	0,094
10	Gianyar	112	53,2	0,968	0,122	20	Pemecutan	161	77	0,945	0,093

Berdasarkan tabel 2. Case 2 Peningkatan beban sistem sebesar 40% (Case 2) menyebabkan penurunan profil

tegangan pada sistem kelistrikan Bali 150 kV 20-bus menjadi 0,942–0,969 p.u. Sebagian besar bus masih berada pada kisaran 0,967–0,969 p.u., namun tiga bus mengalami undervoltage (di bawah 0,95 p.u.), yaitu GI Pesanggaran (0,949 p.u.), Pemecutan (0,945 p.u.), dan Pecatu (0,942 p.u.), dengan Bus Pecatu memiliki tegangan terendah. Hasil ini menunjukkan bahwa kenaikan beban 40% menurunkan kualitas profil tegangan sistem sehingga diperlukan penambahan sumber daya atau kompensasi daya reaktif untuk mempertahankan tegangan sesuai standar operasi.

c. Tabel Case 3

Tabel 3 Case 3 (Keadaan pada Saat Integrasi Dengan 4 PLTS Kapasitas 25 MW)

DATA YANG DITELITI PADA JARINGAN BALI 20 BUS 150 kV (CASE 3)											
No	Bus/GI	P (MW)	Q (MVAR)	(p.u)	Resistansi R' (Ohm/km)	No	Bus/GI	P (MW)	Q (MVAR)	(p.u)	Resistansi R' (Ohm/km)
1	Gilimanuk	25,2	12,6	0,975	0,125	11	Sanur	126	61,6	0,974	0,095
2	Celukan Bawang	35	16,8	0,975	0,12	12	Pbian	154	72,8	0,974	0,094
3	Pemaron	58,8	28	0,975	0,12	13	Pklod	168	81,2	0,974	0,093
4	BTRTI	28	14	0,975	0,125	14	Bandara	105	49	0,975	0,092
5	Pygan	39,2	18,2	0,975	0,128	15	Nusa Dua	133	64,4	0,985	0,091
6	Amlapura	77	37,8	0,974	0,13	16	Pesanggaran	196	95,2	0,977	0,09
7	Negara	42	19,6	0,982	0,125	17	Pesanggaran	119	56	0,976	0,091
8	Asari (Antosari)	49	23,8	0,975	0,124	18	Kubu	33,6	15,4	0,989	0,132
9	Kapal	133	63	0,975	0,118	19	Pecatu	98	47,6	0,98	0,094
10	Gianyar	112	53,2	0,975	0,122	20	Pemecutan	161	77	0,976	0,093

Berdasarkan hasil simulasi, pada tabel 3 integrasi 4 PLTS berkapasitas 25 MW memberikan dampak positif terhadap performansi sistem kelistrikan Bali 150 kV. Profil tegangan meningkat dan seluruh bus berhasil dipertahankan dalam rentang 0,974–0,989 p.u., sehingga tidak terdapat lagi bus yang mengalami undervoltage. Hasil ini menunjukkan bahwa penetrasi PLTS mampu meningkatkan kualitas tegangan, memperbaiki kondisi operasi jaringan, serta mendukung penyaluran daya yang lebih efisien dibandingkan kondisi sebelum integrasi PLTS (Case 2).

B. Profil Tegangan

Tabel 4 Profil Tegangan

PROFIL TEGANGAN 20 BUS KELISTRIKAN BALI 150 kV									
No	Bus/GI	Case 1	Case 2	Case 3	No	Bus/GI	Case 1	Case 2	Case 3
1	Gilimanuk	1,009	0,969	0,975	11	Sanur	1,007	0,967	0,974
2	Celukan Bawang	1,009	0,969	0,975	12	Pbian	1,008	0,968	0,974
3	Pemaron	1,009	0,969	0,975	13	Pklod	1,008	0,968	0,974
4	BTRTI	1,009	0,969	0,975	14	Bandara	1,007	0,967	0,975
5	Pygan	1,008	0,968	0,975	15	Nusa Dua	1,007	0,967	0,985
6	Amlapura	1,008	0,968	0,974	16	Pesanggaran	1,007	0,967	0,977
7	Negara	1,009	0,969	0,982	17	Pesanggaran	1,007	0,949	0,976
8	Asari (Antosari)	1,008	0,968	0,975	18	Kubu	1,006	0,968	0,989
9	Kapal	1,008	0,968	0,975	19	Pecatu	1,006	0,942	0,98
10	Gianyar	1,008	0,968	0,975	20	Pemecutan	1,006	0,945	0,976

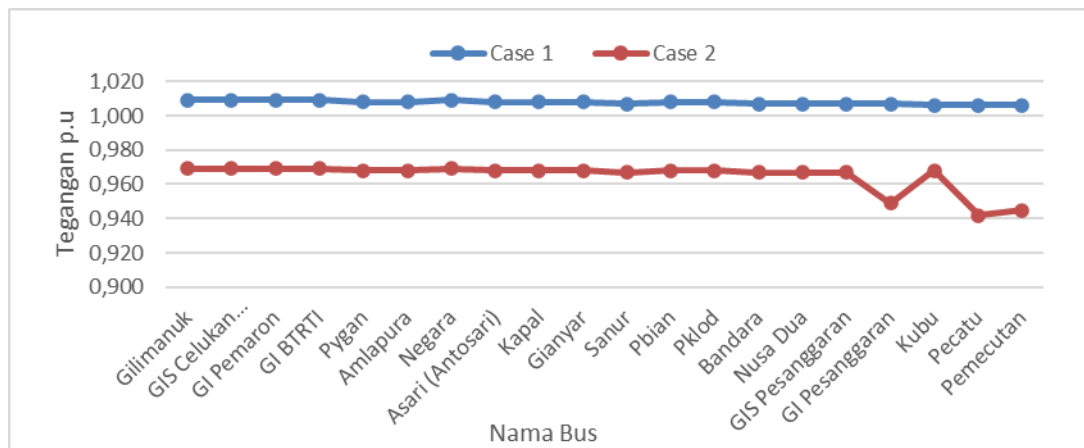
Case 1 = base case

Case 2 = load bus increase 40%

Case 3 = integrasi 4 setiap plts sesuai kapasitas (25 MW)

Berdasarkan hasil simulasi, pada tabel 4 profil tegangan, Case 1 menunjukkan kondisi normal dengan tegangan seluruh bus berada pada kisaran 1,006–1,009 p.u. Setelah beban ditingkatkan pada Case 2, tegangan turun menjadi 0,942–0,969 p.u., sehingga GI Pesanggaran (0,949 p.u.), Pecatu (0,942 p.u.), dan Pemecutan (0,945 p.u.) mengalami kondisi *undervoltage*. Setelah penambahan PLTS pada Case 3, profil tegangan meningkat menjadi 0,975–0,989 p.u. dan seluruh bus kembali berada dalam batas operasi yang diizinkan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan PLTS efektif memperbaiki profil tegangan sistem kelistrikan Bali 150 kV setelah terjadi peningkatan beban.

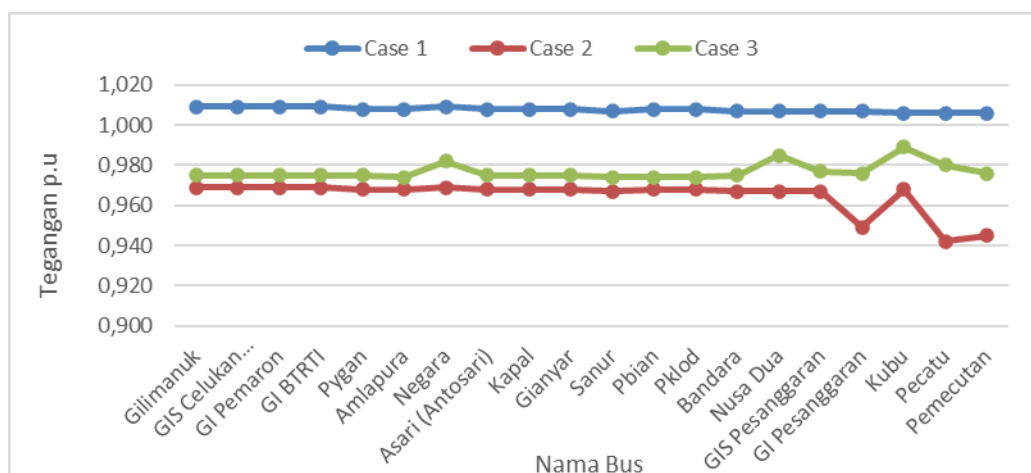
1. Grafik Case 1 dan Case 2



Gambar 3 Grafik Perbandingan Profil Tegangan Case 1 dan Case 2

Pada Gambar 3 Peningkatan beban sebesar 40% menyebabkan rata-rata tegangan sistem turun dari 1,007 p.u. pada Case 1 menjadi 0,963 p.u. pada Case 2, dengan penurunan rata-rata sekitar 0,044 p.u. Penurunan tegangan terjadi pada seluruh bus akibat meningkatnya kebutuhan daya yang menyebabkan arus pada saluran transmisi semakin besar. Beberapa bus mengalami kondisi *undervoltage*, yaitu GI Pesanggaran (0,949 p.u.), Pecatu (0,942 p.u.), dan Pemecutan (0,945 p.u.), dengan Bus Pecatu memiliki nilai tegangan terendah. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan beban menyebabkan jatuh tegangan dan rugi-rugi daya saluran semakin besar sehingga menurunkan profil tegangan sistem. Oleh karena itu, penambahan PLTS diperlukan untuk memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem transmisi Bali 150 kV.

2. Grafik Case 1, Case 2, dan Case 3



Gambar 4 Grafik Perbandinga Profil Tegangan Case 1, Case 2, Dan Case 3

Pada Gambar 4 Peningkatan beban sebesar 40% menyebabkan rata-rata tegangan sistem turun dari 1,007 p.u. (Case 1) menjadi 0,963 p.u. (Case 2), sehingga GI Pesanggaran (0,949 p.u.), Pecatu (0,942 p.u.), dan Pemecutan (0,945 p.u.)

mengalami kondisi *undervoltage*. Setelah penambahan PLTS 25 MW pada Case 3, rata-rata tegangan meningkat menjadi 0,977 p.u. dan seluruh bus kembali berada di atas batas minimum 0,95 p.u. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan PLTS mampu memperbaiki profil tegangan dan mengurangi rugi-rugi daya pada sistem transmisi Bali 150 kV.

E. Analisis Persentase Perubahan Profil Tegangan Terhadap Rugi Rugi Daya

Tabel 5 Analisis Persentase Perubahan Profil Tegangan Terhadap Rugi Rugi Daya

Parameter Sistem	Case 1(Base Case)	Case 2 (Load Increase 40%)	Case 3 (Integrasi 4 PLTS @25 MW)
Total Beban Daya Aktif (P_{load})	1.452 MW	2.032,8 MW	2032,8 MW
Total Beban Daya Reaktif (Q_{load})	693 MVAR	970,2 MVAR	970,2 MVAR
Kapasitas Injeksi PLTS	0,00 MW	0,00 MW	100,00 MW
Total Rugi-Rugi Daya Aktif (P_{loss})	14,25 MW	28,40 MW	18,65 MW
Total Rugi-Rugi Daya Reaktif (Q_{loss})	48,10 MVAR	98,75 MVAR	62,30 MVAR
Rata-Rata Tegangan Sistem (V_{avg})	1,007 p.u.	0,963 p.u.	0,977 p.u.

Berdasarkan Tabel 5, peningkatan beban sebesar 40% pada Case 2 memicu lonjakan rugi-rugi daya aktif (P_{loss}) dari 14,25 MW menjadi 28,40 MW akibat tingginya arus pada saluran transmisi. Namun, integrasi 4 unit PLTS berkapasitas total 100 MW pada Case 3 terbukti efektif menekan total rugi-rugi daya aktif sebesar 34,33% (menjadi 18,65 MW) dan rugi-rugi daya reaktif sebesar 36,91% (menjadi 62,30 MVAR). Selain itu, penetrasi PLTS yang menyuplai daya dekat pusat beban berhasil memulihkan rata-rata tegangan sistem sebesar 1,45% menjadi 0,977 p.u., sehingga seluruh bus berada di batas operasi aman.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi aliran daya (*load flow analysis*) pada sistem kelistrikan Bali 150 kV 20-bus menggunakan DIgSILENT PowerFactory, dapat disimpulkan bahwa integrasi PLTS berkapasitas 100 MW (4×25 MW) mampu meningkatkan performansi sistem. Rata-rata profil tegangan sistem yang semula sebesar 1,007 p.u. pada kondisi *base case* menurun menjadi 0,963 p.u. setelah beban dinaikkan sebesar 40%, kemudian meningkat kembali menjadi 0,977 p.u. setelah integrasi PLTS, sehingga seluruh bus kembali berada dalam batas tegangan operasi yang diizinkan. Selain itu, integrasi PLTS juga menurunkan rugi-rugi daya sistem dibandingkan kondisi peningkatan beban, yang menunjukkan berkurangnya aliran daya dari pembangkit utama menuju pusat beban. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi PLTS efektif dalam meningkatkan kualitas tegangan dan efisiensi operasi sistem kelistrikan Bali 150 kV.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Abidin, D. Z., Krismanto, A. U., & Wartana, I. M. (2024). *Analysis of the Impact of Cirata Floating Solar Power Plant Integration on the Voltage Stability of the 500 kV Java–Bali System*.
- [2] Bali, P. B. (2023). *Data Sistem Kelistrikan Bali Tahun 2023*. PT PLN (Persero) Unit Induk Distribusi Bali.
- [3] Edison, P., & Edison, L. (2021). Evaluasi rugi-rugi daya pada sistem energi terbarukan berbasis PLTS dan turbin angin. *Renewable Energy and Power Systems*, 234–245.
- [4] Hidayat, T. G., Saputra, I. G. N. A. D., & Sutawinaya, I. P. (2023). *Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terapung Berkapasitas 10 Megawatt di Waduk Muara Nusa Dua* (Diploma Thesis). Politeknik Negeri Bali.

-
- [5] Kawambwa, S., Mwifunyi, R., Mnyanghwalo, D., et al. (2021). An improved backward/forward sweep power flow method based on network tree depth for radial distribution systems. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 8, Article 7.
 - [6] Rasheed, M. A., & Verayiah, R. (2021). Investigation of optimal PV allocation to minimize system losses and improve voltage stability for distribution and transmission networks using MATLAB and DlgSILENT. *Frontiers in Energy Research*, 9, 695814.
 - [7] R. T. (2019). Analisis *drop* tegangan pada jaringan tegangan menengah dengan menggunakan simulasi program ETAP. *Jurnal Teknologi Energi*, 10.
 - [8] P. L. Bhattar, N. M. Pindoriya, A. Sharma, and R. T. Naayagi, "AC-DC Multi-Phase Power Flow Algorithms for Active Distribution System Analysis," *Electric Power Systems Research*, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109924.
 - [9] A. S. Khavari, M. R. A. Pahlavani, and M. S. Naderi, "Low Voltage Distribution Networks Modeling and Unbalanced (Optimal) Power Flow: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143026–143084, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3120803.
 - [10] Werkie, Y. G. (2022). Optimal allocation of multiple distributed generation units in power distribution networks for voltage profile improvement and power losses minimization. *Cogent Engineering*.
 - [11] *Integration of Renewable Based Distributed Generation for Power Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement*. (n.d.). *Energies*.
 - [12] Wijaya et al. (2022) *Perencanaan Pembangkit Hybrid Optimal Di Grid 3 Nusa, Pulau Nusa Penida—Menganalisis integrasi PLTB–PLTS–BESS untuk stabilitas frekuensi dan minimisasi biaya (COE), mengikuti Grid Code Jawa–Bali (49–51 Hz)*
 - [13] Sontakke, S. K. (2015). Power System Analysis of a Microgrid using ETAP. *International Journal of Electrical and Electronics Engineers*, 3(5).