

ANALISIS KESTABILAN TEGANGAN STATIS DAN DINAMIS PADA SISTEM KELISTRIKAN NUSA PENIDA

I Made Wahyu Ary Wedanta¹, Awan Uji Krismanto², Ni Putu Agustini³

Teknik Elektro S-1, Institut Teknologi Nasional, Malang, Indonesia

¹wahyuary311@gmail.com, ²awanujikrismanto@lecturer.itn.ac.id, ³ni_putu_agustini@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Sistem kelistrikan Nusa Penida merupakan sistem terisolasi yang telah mengintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berkapasitas 4,2 MWp, sehingga perlu dilakukan analisis pengaruhnya terhadap kestabilan tegangan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh integrasi PLTS 4,2 MWp terhadap kestabilan tegangan statis dan dinamis pada sistem kelistrikan Nusa Penida 20 kV menggunakan DigSILENT PowerFactory. Simulasi dilakukan pada sistem 13 bus dengan empat skenario, yaitu *base case*, integrasi PLTS, penambahan beban 100%, dan integrasi PLTS dengan penambahan beban 100%. Analisis statis dilakukan menggunakan kurva P–V dan Q–V, sedangkan analisis dinamis menggunakan simulasi *time domain* dengan gangguan *short circuit*. Hasil *load flow* menunjukkan seluruh tegangan bus berada dalam batas 0,95–1,05 p.u. Profil tegangan *base case* berada pada rentang 1,000–1,021 p.u., sedangkan setelah integrasi PLTS menjadi 1,000–1,018 p.u. Kurva P–V menunjukkan peningkatan margin kestabilan tegangan, ditandai dengan kenaikan *nose point* pada Busbar 8 dari 217,4 MW menjadi 218 MW, Busbar 9 dari 198 MW menjadi 200 MW, dan Busbar 10 dari 210 MW menjadi 215 MW. Kurva Q–V menunjukkan peningkatan kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan tegangan. Hasil simulasi dinamis menunjukkan sistem mampu kembali stabil setelah gangguan *short circuit* selama 0,5 detik. Secara keseluruhan, integrasi PLTS 4,2 MWp meningkatkan margin kestabilan tegangan statis dan mempertahankan kestabilan tegangan dinamis sistem kelistrikan Nusa Penida.

Kata Kunci: sistem kelistrikan Nusa Penida, kestabilan tegangan, analisa stabilitas statis, analisa dinamis, DigSILENT PowerFactory.

Abstract— The Nusa Penida power system is an isolated system that has integrated a 4.2 MWp Solar Power Plant (PLTS), requiring an analysis of its impact on voltage stability. This study aims to analyze the effect of integrating a 4.2 MWp PLTS on static and dynamic voltage stability in the 20 kV Nusa Penida power system using DigSILENT PowerFactory. Simulations were conducted on a 13-bus system under four scenarios: *base case*, PLTS integration, 100% load increase, and PLTS integration with a 100% load increase. Static analysis was performed using P–V and Q–V curves, while dynamic analysis employed *time-domain* simulations with a *short-circuit* disturbance. The *load-flow* results show that all bus voltages remained within the 0.95–1.05 p.u. operating limit. The

voltage profile ranged from 1.000–1.021 p.u. in the *base case* and from 1.000–1.018 p.u. after PLTS integration. The P–V curves indicate an improvement in voltage stability margin, as reflected by the increase in the *nose point* from 217.4 MW to 218 MW at Busbar 8, from 198 MW to 200 MW at Busbar 9, and from 210 MW to 215 MW at Busbar 10. The Q–V curves also indicate an improved capability of the system to maintain voltage stability. Dynamic simulations demonstrate that the system can return to a stable condition following a 0.5-second *short-circuit* disturbance. Overall, the integration of the 4.2 MWp PLTS improves the static voltage stability margin while maintaining dynamic voltage stability in the Nusa Penida power system.

Keywords: Nusa Penida electrical power system, voltage stability, static voltage stability analysis, dynamic voltage stability analysis, DigSILENT PowerFactory.

I. PENDAHULUAN

Listrik merupakan kebutuhan esensial yang mendukung seluruh aspek kehidupan manusia, mulai dari kegiatan rumah tangga, sosial, ekonomi, hingga industri [1],[2]. Tantangan dalam menyediakan akses listrik yang andal dan merata masih menjadi isu penting di Indonesia, terutama di wilayah kepulauan dan daerah terpencil. Walaupun rasio elektrifikasi nasional telah mencapai 99,87% pada tahun 2023, masih terdapat beberapa daerah yang menghadapi kendala dalam hal kontinuitas, kualitas tegangan, serta stabilitas pasokan Listrik [3]. Pemerintah terus berupaya mencapai target 100% elektrifikasi pada tahun 2024 sebagai wujud komitmen dalam pemerataan energi di seluruh wilayah nasional [3].

Salah satu daerah yang menjadi perhatian dalam upaya pengembangan sistem kelistrikan adalah Pulau Nusa Penida, Kabupaten Klungkung, Provinsi Bali. Sebagai kawasan kepulauan yang memiliki potensi wisata dan ekonomi tinggi, kebutuhan listrik di Nusa Penida terus meningkat seiring bertambahnya jumlah penduduk, fasilitas pariwisata, dan kegiatan ekonomi lainnya [4]. Saat ini sistem

kelistrikan Nusa Penida melayani sekitar 21.238 pelanggan dengan beban puncak mencapai $\pm 12,26$ MW. Adapun kapasitas pembangkit yang tersedia di sistem ini sebesar 14,45 MW, dengan cadangan daya sekitar 15,2% [4]. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kelistrikan Nusa Penida telah mendekati batas kemampuan dayanya dan memerlukan optimalisasi dalam hal keandalan serta kestabilan tegangan agar mampu memenuhi peningkatan kebutuhan energi di masa mendatang.

Dalam mendukung transisi menuju energi bersih, Nusa Penida juga telah menjadi salah satu wilayah percontohan pengembangan energi baru terbarukan (EBT) oleh PLN dan PLN Indonesia Power. Saat ini telah beroperasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Hybrid berkapasitas 4,2 MWp yang dilengkapi dengan sistem penyimpanan energi *Battery Energy Storage System* (BESS) berkapasitas 3 MW [5],[6]. Selanjutnya, PLN merencanakan proyek lanjutan dengan kapasitas total 14,5 MW dari kombinasi PLTS, PLTB, dan BESS. Rencana tersebut sejalan dengan target menjadikan Nusa Penida sebagai pulau mandiri energi bersih dengan bauran EBT mencapai 100% pada tahun-tahun mendatang [6].

Namun demikian, peningkatan penetrasi energi terbarukan dalam sistem kelistrikan membawa konsekuensi terhadap kestabilan sistem tenaga, terutama pada aspek kestabilan tegangan [7]. Sumber energi terbarukan seperti PLTS dan PLTB terhubung ke jaringan melalui konverter elektronik daya, yang menyebabkan menurunnya inersia sistem serta sensitivitas yang lebih tinggi terhadap fluktuasi beban dan gangguan jaringan [7], [8]. Penurunan inersia ini dapat memengaruhi kemampuan sistem dalam mempertahankan tegangan pada kondisi normal maupun saat terjadi gangguan, sehingga dapat menimbulkan risiko ketidakstabilan tegangan (*voltage instability*) apabila tidak diantisipasi dengan baik [8].

Kestabilan tegangan merupakan salah satu faktor penting dalam menjaga keandalan dan keamanan operasi sistem tenaga listrik. Berdasarkan standar, batas deviasi tegangan yang diizinkan adalah $\pm 5\%$ dari nilai nominal. Apabila tegangan sistem turun di bawah batas tersebut secara berkelanjutan, maka akan berdampak pada penurunan kualitas daya, gangguan pada peralatan listrik, bahkan risiko pemadaman menyeluruh (*blackout*) pada jaringan lokal. Oleh karena itu, analisis terhadap kestabilan tegangan menjadi langkah penting untuk memahami respons sistem terhadap perubahan beban, gangguan, maupun integrasi sumber pembangkit baru.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, penulis merumuskan beberapa rumusan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh perubahan beban dan integrasi pembangkit energi baru terbarukan (PLTS) terhadap kestabilan tegangan statis sistem kelistrikan Nusa Penida.
2. Bagaimana pengaruh perubahan beban dan integrasi pembangkit energi baru terbarukan (PLTS) terhadap

kestabilan tegangan dinamis sistem kelistrikan Nusa Penida.

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Menganalisis kestabilan statis dengan menggunakan metode kurva P-V dan Q-V.
2. Menganalisis kestabilan tegangan dinamik yang terjadi saat penambahan beban dan integrasi PLTS pada sistem.

II. KAJIAN PUSTAKA

Analisa Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan merupakan salah satu aspek penting dalam sistem tenaga listrik karena berkaitan langsung dengan kemampuan sistem dalam menjaga kontinuitas penyaluran daya listrik serta mempertahankan kualitas tegangan agar tetap baik [9]. Stabilitas sistem dapat diartikan sebagai kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap berada pada kondisi operasi normal atau kembali stabil setelah mengalami gangguan, tanpa menimbulkan pemadaman maupun pelepasan komponen sistem pada area tertentu [9],[10]. Untuk menjaga kondisi tersebut, integritas sistem harus tetap terpelihara sehingga tidak terjadi pemutusan baik pada sisi pembangkit maupun sisi beban .

Stabilitas tegangan dipengaruhi oleh berbagai parameter, seperti karakteristik sistem tenaga, karakteristik beban, pengaturan kontrol kontinu maupun diskrit, serta interaksi antar sistem proteksi [11]. Pada umumnya, sistem tenaga listrik dirancang agar dapat beroperasi pada rentang tegangan sekitar -5% hingga $+10\%$ dari tegangan nominal [11]. Ketika nilai tegangan berada di luar batas tersebut, maka sistem dapat mengalami kondisi yang dikenal sebagai *voltage collapse*. Ketidakstabilan tegangan terjadi ketika sistem tidak mampu mempertahankan tegangan pada batas yang diizinkan, yaitu antara 0,95 pu hingga 1,05 pu, baik pada sebagian maupun seluruh bus, dalam kondisi normal maupun setelah terjadi gangguan [11], [12]. Kondisi ini dapat dipicu oleh gangguan tunggal maupun kombinasi beberapa faktor yang menyebabkan penurunan tegangan secara bertahap dan tidak terkendali.

Analisis kestabilan tegangan umumnya dibedakan menjadi analisis kestabilan tegangan statis dan dinamis [9], [13]. Analisis stabilitas tegangan statis banyak digunakan dalam operasi *real-time* karena proses perhitungannya lebih sederhana dan cepat. Sementara itu, analisis stabilitas dinamis memiliki tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan analisis statis, namun membutuhkan data yang lebih detail dalam proses pemodelan serta berkaitan dengan koordinasi sistem proteksi, pengendalian, dan analisis stabilitas jangka pendek. Kedua metode tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi penyebab serta mekanisme terjadinya ketidakstabilan tegangan [13]. Selain itu, analisis ini juga membantu dalam menentukan area sistem yang rentan terhadap gangguan tegangan dan memilih tindakan yang paling efektif untuk meningkatkan kestabilan

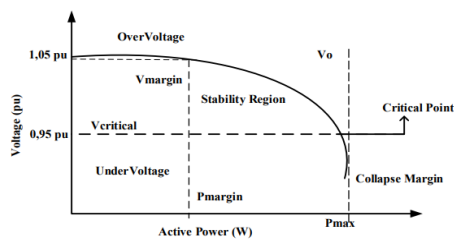
sistem. Melalui pengembangan dan perluasan jaringan tenaga listrik, tingkat kestabilan tegangan sistem dapat ditingkatkan secara lebih optimal.

1. Analisa Stabilitas Tegangan Statis

Metode yang umum digunakan dalam analisis stabilitas tegangan statis meliputi kurva hubungan antara daya aktif dan tegangan (P-V), kurva hubungan antara daya reaktif dan tegangan (Q-V) [14], [15]. Metode ini bertujuan untuk mengidentifikasi titik *collapse*, yaitu titik di mana tegangan mengalami penurunan yang drastis pada beban maksimal yang dapat diterima pada sistem. Keruntuhan tegangan umumnya terjadi ketika sistem mengalami gangguan atau kekurangan pasokan daya reaktif [14].

a) Analisa kurva P-V (Daya Aktif Terhadap Tegangan)

Metode analisis kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan) merupakan pendekatan yang paling umum digunakan dalam analisis stabilitas statis dan berfungsi untuk menentukan tingkat keamanan tegangan [14], [16]. Metode ini sering dimanfaatkan untuk mengevaluasi stabilitas tegangan dengan menentukan margin daya aktif yang tersedia sebelum sistem mencapai titik *voltage collapse*.

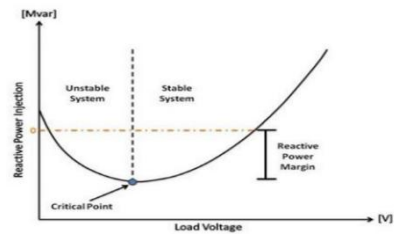


Gambar 1. Grafik Kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan)

Dari gambar 1 grafik kurva P-V (Daya Aktif terhadap Tegangan) menggambarkan penurunan tegangan secara bertahap seiring dengan meningkatnya permintaan daya. Tegangan akan terus menurun hingga mencapai titik puncak kurva (*nose point*) [14]. Pada titik ini, peningkatan daya aktif lebih lanjut tidak lagi menghasilkan tegangan yang memadai, sehingga kondisi ini dikenal sebagai *voltage collapse*. Jarak antara titik operasi dengan *nose point* disebut sebagai margin daya aktif, sedangkan jarak antara titik operasi dan titik kritis dikenal sebagai margin tegangan.

b) Analisis Kurva Q-V (Daya Reaktif Terhadap Tegangan)

Analisis stabilitas tegangan melalui Kurva Q-V ini adalah untuk melihat pada kondisi beban total berapa (MVar) tegangan sistem mengalami kollaps [15], [17]. Artinya kemampuan sistem dalam menyalurkan daya reaktif telah melebihi kemampuan sistem itu sendiri Adapun kurva V-Q dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Kurva Q-V (Daya Reaktif Terhadap Tegangan)

Garis putus-putus pada gambar 2 tersebut memperlihatkan titik lokasi yang menyatakan sebagai batas titik kritis. Titik ini menyatakan batas kemampuan beban pada keadaan mantap untuk stabilitas tegangan jaringan, sedangkan bagian atas dari titik kritis menyatakan kondisi operasi stabil dan di bawah titik kritis menyatakan kondisi operasi tidak stabil [15].

2. Analisa Stabilitas Tegangan Dinamik

Analisis stabilitas tegangan dinamis memiliki peran penting dalam perencanaan dan desain jaringan listrik selama operasi sistem [13]. Pendekatan ini didasarkan pada persamaan diferensial untuk mengamati bagaimana tegangan pada bus berubah akibat variasi parameter operasi sistem [13], [18]. Berbagai parameter PLTS, seperti intensitas penyinaran matahari (radiasi matahari dan suhu), serta pemodelan dinamis (konverter elektronik daya dan kompensator daya reaktif), memainkan peran krusial dalam analisis stabilitas tegangan dinamis pada sistem yang terhubung ke jaringan [18].

Analisa dinamik digunakan sebagai mengevaluasi perilaku tegangan selama terjadi gangguan dan saat terjadi kenaikan beban pada sistem transmisi. Dengan mempelajari analisis domain waktu dengan mempertimbangkan gangguan pada lokasi dan waktu tertentu. Metode yang digunakan untuk analisa tegangan dinamis adalah analisa stabilitas *small signal*, simulasi domain waktu, dan analisis metode bifurkasi [13], [19].

Analisis kestabilan tegangan dinamik yang akan dilakukan menggunakan gangguan *short-circuit* pada busbar beban dengan mengatur atau setting waktu selama 10 detik dan juga menggunakan metode menaikkan beban sebesar 50% di *DigSILENT PowerFactory*.

B. PLTS Nusa Penida

PLTS Nusa Penida merupakan salah satu pembangkit listrik tenaga surya yang beroperasi secara *on-grid*. PLTS ini berlokasi di Pulau Nusa Penida, yang secara administratif masuk wilayah Kabupaten Klungkung, Provinsi Bali. Keberadaan PLTS ini bertujuan untuk meningkatkan bauran energi terbarukan serta mengurangi ketergantungan terhadap pembangkit berbahan bakar fosil di sistem kelistrikan Bali, khususnya pada sistem kelistrikan terisolasi di Nusa Penida.

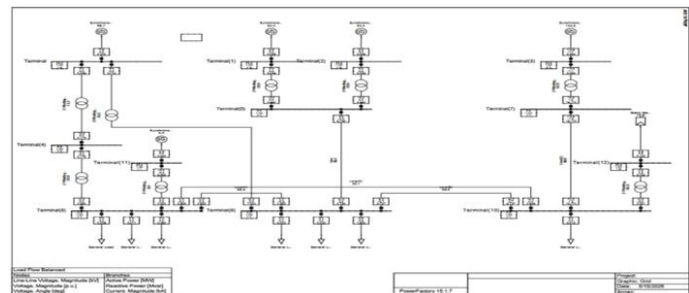
PLTS Nusa Penida memiliki kapasitas sekitar 4,2 MWp, yang dikombinasikan dengan sistem penyimpanan energi (*battery energy storage*) untuk menjaga keandalan suplai listrik, mengingat karakteristik energi surya yang bergantung

pada intensitas cahaya matahari. Sistem ini juga mendukung pengoperasian jaringan listrik yang lebih stabil dan efisien, terutama pada saat beban puncak maupun fluktuasi daya.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berfokus pada analisis kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan 20 kV di Nusa Penida akibat integrasi PLTS Nusa Penida ke dalam jaringan sistem tenaga listrik. Analisis yang digunakan meliputi studi kestabilan tegangan statis melalui kurva hubungan daya aktif terhadap tegangan (P–V), kurva hubungan daya reaktif terhadap tegangan (Q–V), serta analisis kestabilan tegangan dinamis untuk mengetahui respons sistem terhadap gangguan dan perubahan kondisi operasi.

A. Studi Kasus



Gambar 3. Single Line Diagram Sistem Kelistrikan Nusa Penida 20kV

Dari gambar 3 data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data Single Line Diagram, data sistem Nusa Penida 20 kV yang digunakan terdiri dari 13 bus, 1 buah slack bus, 4 buah generator bus dan 3 buah load bus. *Single line diagram* digunakan untuk merepresentasikan konfigurasi jaringan distribusi, posisi pembangkit, bus, saluran, serta beban yang terdapat pada sistem kelistrikan Nusa Penida. Data sistem tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar pemodelan dan simulasi pada perangkat lunak DiGSILENT PowerFactory. Pemodelan sistem dilakukan untuk memperoleh kondisi operasi awal melalui analisis *load flow*, sehingga dapat diketahui profil tegangan pada masing-masing bus serta aliran daya pada jaringan. Hasil kondisi awal tersebut kemudian digunakan sebagai acuan dalam analisis kestabilan tegangan pada berbagai skenario penelitian.



Gambar 4. PLTS Nusa Penida

Gambar 4 menunjukkan PLTS Nusa Penida berkapasitas 4,2 MWp yang terintegrasi pada sistem kelistrikan Nusa Penida 20 kV. Integrasi PLTS dapat memengaruhi kondisi operasi dan kestabilan tegangan karena daya keluarannya bergantung pada radiasi matahari. Oleh karena itu, penelitian ini menganalisis pengaruh integrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan statis menggunakan kurva P-V dan Q-V serta dinamis menggunakan analisis *time-domain*.

B. Flowchart

Diagram alir penelitian dapat dilihat dibawah ini :



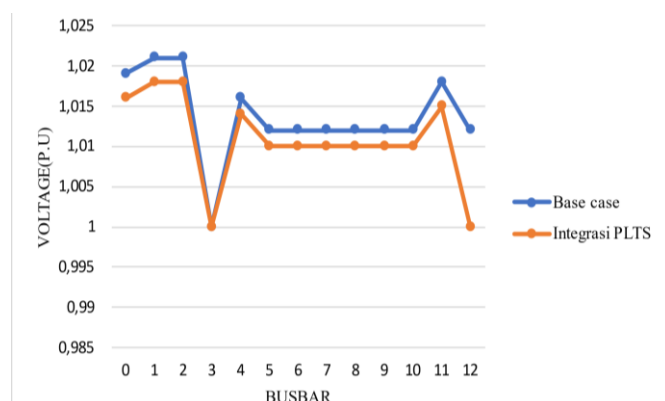
Gambar 5. Blok Diagram

Gambar 5 menunjukkan tahapan penelitian yang dilakukan untuk menganalisis kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan Nusa Penida. Penelitian diawali dengan memasukkan data sistem berupa generator, beban, saluran, trafo, dan PLTS 4,2 MWp ke dalam perangkat lunak DIGSILENT PowerFactory. Selanjutnya dilakukan simulasi *load flow* untuk memperoleh profil tegangan sistem. Apabila tegangan berada dalam batas operasi 0,95–1,05 p.u., analisis dilanjutkan dengan evaluasi profil tegangan dan kestabilan tegangan statis menggunakan kurva P-V dan Q-V. Setelah diperoleh kondisi *base case*, dilakukan integrasi PLTS 4,2 MWp ke dalam sistem dan simulasi kembali untuk membandingkan pengaruh integrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan. Tahap akhir dilakukan melalui analisis kestabilan tegangan dinamis untuk mengetahui respons sistem terhadap perubahan kondisi operasi atau gangguan. Hasil seluruh simulasi kemudian dianalisis dan digunakan untuk memperoleh kesimpulan mengenai pengaruh integrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan sistem kelistrikan Nusa Penida.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Profil tegangan

Setelah sistem dapat dijalankan aliran daya (*Load Flow*), maka tahap selanjutnya menganalisa profil tegangan yang berguna untuk mengetahui perbandingan pada kondisi *base case* dan setelah pengintegrasian PLTS 4,2 MWp kedalam sistem.



Gambar 6. Hasil Load Flow Terhadap Profil Tegangan

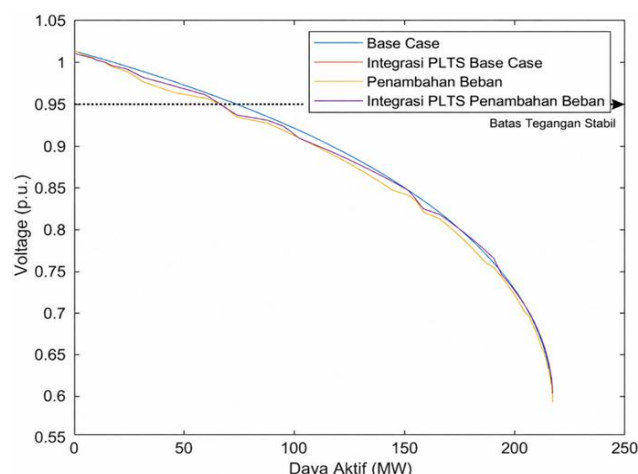
Berdasarkan grafik pada Gambar 6, hasil analisis aliran daya (*load flow*) menunjukkan bahwa profil tegangan pada setiap busbar mengalami variasi akibat perbedaan karakteristik pembebanan dan konfigurasi jaringan, baik pada kondisi *base case* maupun saat sistem terintegrasi dengan PLTS. Pada kondisi *base case*, tegangan sistem berada di rentang yang cukup tinggi yaitu sekitar 1,012 p.u hingga 1,021 p.u pada sebagian besar busbar, dengan titik terendah berada di busbar 3 dan busbar 12 yang menyentuh nilai 1,000 p.u.

Setelah adanya integrasi PLTS 4,2 MWp, terjadi penurunan profil tegangan (*voltage drop*) di hampir seluruh

busbar dibandingkan dengan kondisi *base case*. Nilai tegangan pada kondisi integrasi PLTS turun menjadi sekitar 1,010 p.u pada busbar 5 hingga busbar 10. Sementara itu, pada busbar 3 dan busbar 12, nilai tegangan tetap stabil dan tidak mengalami perubahan, yaitu persis berada pada nilai nominal 1,000 p.u.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa integrasi PLTS ke dalam sistem kelistrikan Nusa Penida menyebabkan profil tegangan mengalami penurunan yang lebih landai di beberapa titik busbar dibandingkan kondisi *base case*. Meskipun terjadi penurunan nilai p.u setelah PLTS masuk, seluruh profil tegangan pada kedua skenario ini masih beroperasi dalam batas aman yang sangat baik, yaitu berada di dalam rentang standar ketetapan standar 0,95–1,05 p.u, sehingga kualitas penyaluran daya listrik ke beban tetap terjaga andal.

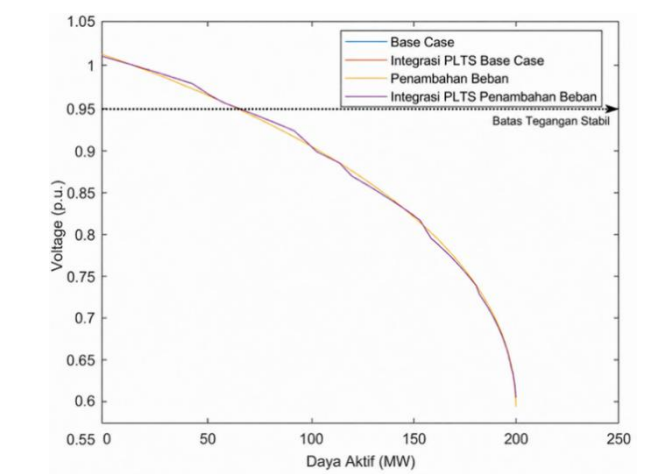
B. Analisa Kurva P-V (Daya Aktif Terhadap Tegangan)



Gambar 7. Hasil Kurva P-V Busbar 8 kondisi kurva hidung tercapai

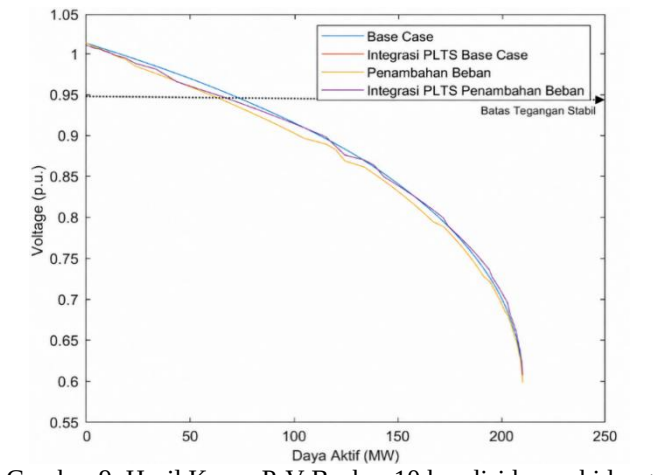
Berdasarkan Gambar 7, kurva P-V Busbar 8 menunjukkan karakteristik kestabilan tegangan pada kondisi *base case*, integrasi PLTS 4,2 MWp, penambahan beban 100%, serta integrasi PLTS 4,2 MWp dengan penambahan beban 100%. Pada kondisi *base case*, *nose point* dicapai pada daya aktif sekitar 210 MW dengan tegangan 0,63 p.u., sedangkan integrasi PLTS meningkatkan kemampuan transfer daya hingga sekitar 215 MW dengan tegangan 0,58 p.u. Pada kondisi penambahan beban 100%, *nose point* berada pada daya aktif sekitar 210 MW dengan tegangan sekitar 0,60 p.u., sedangkan pada kondisi integrasi PLTS disertai penambahan beban 50%, daya aktif maksimum meningkat hingga sekitar 215 MW dengan tegangan sekitar 0,59 p.u. Pada batas tegangan 0,95 p.u., daya aktif kritis meningkat dari sekitar 70 MW pada *base case* menjadi 73 MW setelah integrasi PLTS. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan beban cenderung menurunkan margin kestabilan tegangan, sedangkan integrasi PLTS 4,2 MWp mampu meningkatkan kemampuan sistem dalam

mempertahankan kestabilan tegangan dan menyalurkan daya aktif yang lebih besar.



Gambar 8. Hasil Kurva P-V Busbar 9 kondisi kurva hidung tercapai

Berdasarkan Gambar 8, kurva P-V Busbar menunjukkan karakteristik kestabilan tegangan pada empat kondisi operasi. Pada kondisi base case, batas tegangan 0,95 p.u. dicapai pada daya aktif sekitar 65 MW, dengan *nose point* sekitar 200 MW pada tegangan 0,60 p.u. Integrasi PLTS 4,2 MWp meningkatkan batas daya aktif pada tegangan 0,95 p.u. menjadi sekitar 67 MW, sedangkan *nose point* berada di sekitar 200 MW pada tegangan 0,60 p.u. Pada kondisi penambahan beban, batas 0,95 p.u. dicapai pada daya aktif sekitar 64 MW, dengan *nose point* sekitar 200 MW dan tegangan 0,595 p.u. Sementara itu, kondisi integrasi PLTS dengan penambahan beban menunjukkan batas 0,95 p.u. sekitar 66 MW, dengan *nose point* sekitar 200 MW pada tegangan 0,605 p.u. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan beban cenderung memperkecil margin kestabilan tegangan, sedangkan integrasi PLTS mampu sedikit meningkatkan kemampuan sistem dalam mempertahankan tegangan pada batas kestabilan yang diizinkan.



Gambar 9. Hasil Kurva P-V Busbar 10 kondisi kurva hidung tercapai

Berdasarkan Gambar 9, kurva P-V menunjukkan karakteristik kestabilan tegangan pada kondisi *base case*, integrasi PLTS 4,2 MWp, penambahan beban 100%, serta integrasi PLTS 4,2 MWp dengan penambahan beban 100%. Keempat kurva menunjukkan penurunan tegangan seiring meningkatnya daya aktif hingga mencapai *nose point*. Pada kondisi *base case*, *nose point* dicapai pada daya aktif sekitar 210 MW dengan tegangan sekitar 0,60 p.u. Integrasi PLTS 4,2 MWp menunjukkan *nose point* pada sekitar 215 MW dengan tegangan sekitar 0,60 p.u. Sementara itu, penambahan beban 100% menyebabkan *nose point* berada pada sekitar 205 MW dengan tegangan sekitar 0,60 p.u., sedangkan integrasi PLTS dengan penambahan beban 100% menghasilkan *nose point* sekitar 210 MW dengan tegangan sekitar 0,60 p.u.

Pada batas tegangan 0,95 p.u., daya aktif kritis berada pada kisaran 65–70 MW, dengan kondisi penambahan beban menunjukkan batas yang lebih rendah dibandingkan kondisi dengan integrasi PLTS. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan beban 100% cenderung mengurangi margin kestabilan tegangan, sedangkan integrasi PLTS 4,2 MWp dapat meningkatkan kembali kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan tegangan dan meningkatkan batas penyaluran daya aktif.

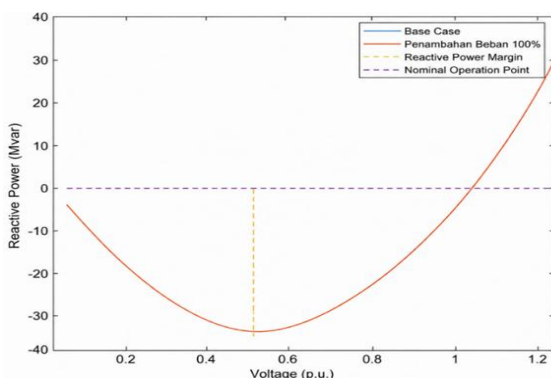
Dari ke 3 busbar beban terbesar didapatkan bahwa hasil simulasi :

Tabel 1. Hasil Analisa Kurva P-V

Bus	Kurva Hidung Tercapai				Batas Stabilitas Tegangan (0.95)	
	Base Case		Integrasi PLTS		Base Case	Integrasi PLTS
	P (MW)	V (Volt)	P (MW)	V (Volt)	P (MW)	P (MW)
8	210	0,63	215	0,58	70	73
9	198	0,62	200	0,58	58	61
10	210	0,60	215	0,60	65	70

Berdasarkan Tabel 1, hasil kurva P-V menunjukkan bahwa peningkatan daya pembebanan menyebabkan penurunan tegangan pada seluruh bus yang dianalisis. Pada kondisi integrasi PLTS 4,2 MWp, batas stabilitas tegangan pada Busbar 8 meningkat dari 70 MW menjadi 73 MW, Busbar 9 dari 58 MW menjadi 61 MW, dan Busbar 10 dari 65 MW menjadi 70 MW. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi PLTS 4,2 MWp memberikan peningkatan kemampuan sistem dalam mempertahankan tegangan sebelum mencapai batas 0,95 p.u. Busbar 10 memiliki kemampuan pembebanan yang relatif lebih tinggi dibandingkan Busbar 8 dan 9, sedangkan Busbar 9 memiliki batas pembebanan terendah sehingga menjadi bus yang lebih kritis terhadap peningkatan beban.

C. Analisa Kurva Q-V (Daya Reaktif Terhadap Tegangan)

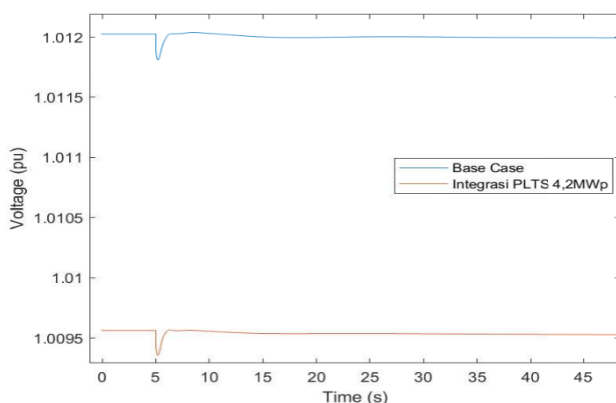


Gambar 10. Hasil Kurva Q-V Busbar 12 kondisi kurva full

Berdasarkan Gambar 10, kondisi base case menunjukkan sistem kelistrikan yang telah terintegrasi dengan PLTS berkapasitas 4,2 MWp. Pada kondisi tersebut, sistem masih mampu memenuhi kebutuhan daya reaktif hingga mencapai sekitar -35 Mvar. Ketika dilakukan penambahan beban sebesar 100%, kurva Q-V menunjukkan karakteristik yang hampir sama dengan kondisi base case. Hal ini ditunjukkan oleh nilai minimum kebutuhan daya reaktif yang tetap berada pada sekitar -35 Mvar, sehingga penambahan beban tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap kebutuhan daya reaktif pada Busbar 12.

Hasil analisis kurva Q-V menunjukkan bahwa kondisi base case dan penambahan beban 100% memiliki nilai minimum margin daya reaktif yang sama, yaitu sekitar -35 Mvar. Kesamaan nilai tersebut mengindikasikan bahwa sistem masih memiliki kemampuan yang baik dalam menjaga kestabilan tegangan meskipun terjadi peningkatan beban. Selain itu, bentuk kurva yang hampir berimpit menunjukkan bahwa integrasi PLTS 4,2 MWp mampu mempertahankan kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan daya reaktif, sehingga profil tegangan tetap berada pada kondisi yang stabil tanpa mengalami penurunan margin kestabilan yang berarti.

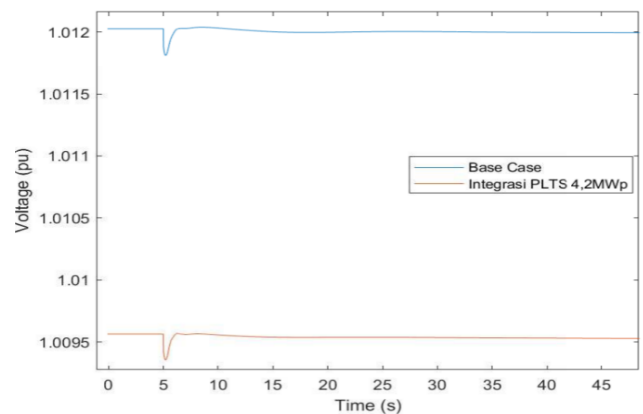
D. Analisa Kestabilan Dinamik



Gambar 11. Grafik Respon Tegangan Dinamik Bus 9

Berdasarkan Gambar 11, terlihat perbandingan respon tegangan dinamik pada Bus 9 antara kondisi base case dan kondisi sistem yang terintegrasi PLTS 4,2 MWp saat beroperasi pada kondisi beban penuh (full load). Gangguan diberikan pada sekitar detik ke-5. Pada kondisi base case, tegangan awal berada di sekitar 1,012 pu. Ketika gangguan terjadi, tegangan mengalami penurunan hingga mendekati 1,0118 pu, kemudian meningkat kembali dan mencapai kondisi stabil setelah gangguan dihilangkan. Respon ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan yang baik untuk memulihkan tegangan menuju kondisi operasi normal. Sementara itu, pada kondisi integrasi PLTS 4,2 MWp, tegangan awal berada pada kisaran 1,0096 pu. Saat gangguan terjadi, tegangan mengalami penurunan sesaat hingga sekitar 1,0094 pu sebelum kembali stabil. Dibandingkan dengan kondisi base case, kurva integrasi PLTS menunjukkan karakteristik yang lebih halus dengan amplitudo osilasi yang relatif kecil selama proses pemulihan.

Secara keseluruhan, kedua kondisi menunjukkan respon yang stabil setelah terjadinya gangguan. Tidak terlihat adanya osilasi berkepanjangan maupun ketidakstabilan tegangan yang dapat mengganggu operasi sistem. Hasil ini mengindikasikan bahwa integrasi PLTS 4,2 MWp tidak menurunkan performa kestabilan tegangan dinamik pada Bus 9. Sistem tetap mampu mempertahankan profil tegangan dalam batas operasi yang diizinkan dan kembali mencapai kondisi tunak dalam waktu yang relatif singkat setelah gangguan dihilangkan. Dengan demikian, keberadaan PLTS 4,2 MWp dapat beroperasi bersama sistem kelistrikan tanpa menimbulkan dampak negatif terhadap kestabilan tegangan dinamik pada Bus 9.

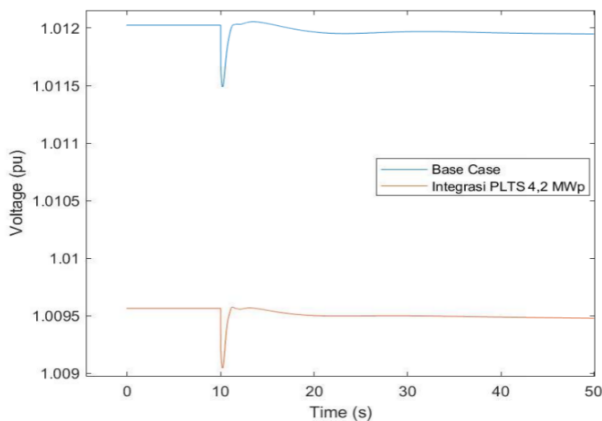


Gambar 12. Grafik Respon Tegangan Dinamik Bus 8

Berdasarkan Gambar 12, terlihat perbandingan antara kondisi base case dan sistem yang terintegrasi PLTS 4,2 MWp setelah diberikan gangguan pada sekitar detik ke-5. Kedua kurva mengalami penurunan tegangan sesaat akibat gangguan, kemudian kembali menuju kondisi stabil setelah gangguan dihilangkan. Pada kondisi base case, tegangan berada pada kisaran 1,012 pu dan mengalami penurunan sesaat hingga sekitar 1,0118 pu saat gangguan terjadi. Setelah itu, tegangan kembali pulih dan stabil mendekati nilai awal. Sementara itu, pada kondisi integrasi PLTS 4,2

MWp, tegangan berada pada kisaran 1,0096 pu dan juga mengalami penurunan sesaat hingga sekitar 1,0094 pu sebelum kembali stabil.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem pada kedua kondisi tetap mampu mempertahankan kestabilan tegangan setelah mengalami gangguan. Namun, integrasi PLTS 4,2 MWp menghasilkan respon yang lebih halus dengan fluktuasi tegangan yang relatif kecil selama proses pemulihan. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan PLTS tidak menyebabkan ketidakstabilan tegangan pada Bus 8 dan sistem tetap dapat kembali ke kondisi operasi normal dalam waktu yang singkat. Dengan demikian, integrasi PLTS 4,2 MWp tidak memberikan dampak negatif terhadap kestabilan tegangan dinamik pada Bus 8 dan tetap mendukung operasi sistem yang stabil setelah terjadinya gangguan.

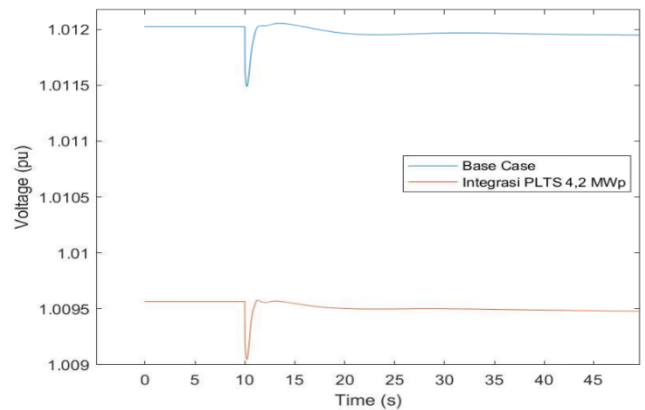


Gambar 13. Grafik Respon Tegangan Dinamik pada Bus 10 ketika terjadi kenaikan beban

Berdasarkan Gambar 13, ditunjukkan respon tegangan dinamik pada Bus 10 untuk kondisi base case dan integrasi PLTS 4,2 MWp ketika sistem mengalami kenaikan beban sebesar 50%. Gangguan diberikan pada sekitar detik ke-10 yang menyebabkan terjadinya penurunan tegangan secara tiba-tiba pada kedua kondisi operasi. Pada kondisi base case, tegangan awal berada di sekitar 1,012 pu. Ketika kenaikan beban terjadi, tegangan turun hingga mendekati 1,0115 pu, kemudian mengalami pemulihan dengan sedikit *overshoot* sebelum akhirnya mencapai kondisi tunak yang stabil. Fenomena ini menunjukkan respon alami sistem dalam menyesuaikan keseimbangan daya setelah terjadi perubahan beban yang signifikan. Sementara itu, pada kondisi integrasi PLTS 4,2 MWp, tegangan awal berada pada kisaran 1,0095 pu. Saat gangguan terjadi, tegangan turun hingga sekitar 1,0090 pu, kemudian meningkat kembali dan mencapai kondisi stabil dalam waktu yang relatif singkat. Respon yang ditunjukkan memiliki karakteristik yang serupa dengan kondisi base case, tanpa adanya osilasi yang berkepanjangan.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa baik sebelum maupun sesudah integrasi PLTS, sistem tetap mampu mempertahankan kestabilan tegangan setelah terjadi kenaikan beban. Meskipun terjadi penurunan tegangan sesaat akibat meningkatnya kebutuhan daya, sistem dapat kembali

menuju kondisi operasi yang stabil dalam waktu singkat. Dengan demikian, integrasi PLTS 4,2 MWp tidak menyebabkan penurunan kestabilan tegangan dinamik pada Bus 10 dan tetap mampu mendukung operasi sistem saat menghadapi perubahan beban yang cukup besar.



Gambar 14. Grafik Respon Tegangan Dinamik pada Bus 9 ketika terjadi kenaikan beban

Berdasarkan Gambar 14, ditunjukkan respon tegangan dinamik pada Bus 9 untuk kondisi *base case* dan integrasi PLTS 4,2 MWp ketika sistem mengalami kenaikan beban sebesar 50%. Kenaikan beban diberikan pada sekitar detik ke-10 yang menyebabkan terjadinya penurunan tegangan secara tiba-tiba pada kedua kondisi operasi. Pada kondisi base case, tegangan awal berada pada kisaran 1,012 pu. Ketika terjadi kenaikan beban, tegangan mengalami penurunan hingga sekitar 1,0115 pu akibat meningkatnya kebutuhan daya pada sistem. Setelah gangguan terjadi, tegangan kembali meningkat dan mengalami sedikit *overshoot* sebelum mencapai kondisi stabil pada nilai mendekati kondisi awal. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki kemampuan yang baik dalam memulihkan tegangan setelah mengalami perubahan beban. Sementara itu, pada kondisi integrasi PLTS 4,2 MWp, tegangan awal berada pada kisaran 1,0095 pu. Saat kenaikan beban terjadi, tegangan turun hingga mendekati 1,0090 pu, kemudian kembali meningkat dan mencapai kondisi tunak tanpa menunjukkan osilasi yang signifikan. Respon ini mengindikasikan bahwa sistem tetap mampu menjaga kestabilan tegangan meskipun terjadi peningkatan kebutuhan daya.

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa baik pada kondisi sebelum maupun sesudah integrasi PLTS 4,2 MWp, sistem tetap berada dalam kondisi stabil setelah mengalami kenaikan beban. Tidak terdapat osilasi berkepanjangan maupun ketidakstabilan yang dapat mengganggu operasi sistem. Dengan demikian, integrasi PLTS 4,2 MWp tidak memberikan dampak negatif terhadap kestabilan tegangan dinamik pada Bus 9 dan sistem tetap mampu mempertahankan profil tegangan dalam batas operasi yang diizinkan setelah terjadi gangguan berupa kenaikan beban sebesar 50%.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis aliran daya, kestabilan tegangan statis menggunakan kurva P–V dan Q–V, serta analisis kestabilan tegangan dinamis pada sistem kelistrikan 20 kV Nusa Penida menggunakan DIGSILENT PowerFactory, dapat disimpulkan bahwa:

Kondisi profil tegangan sistem pada kondisi base case maupun setelah integrasi PLTS 4,2 MWp masih berada dalam batas operasi yang diizinkan, yaitu 0,95–1,05 p.u. Pada kondisi base case, tegangan sebagian besar busbar berada pada kisaran 1,012–1,021 p.u., sedangkan setelah integrasi PLTS terjadi sedikit penurunan profil tegangan pada beberapa busbar hingga sekitar 1,010 p.u. Meskipun demikian, seluruh busbar tetap berada dalam kondisi operasi yang aman.

Integrasi PLTS 4,2 MWp memberikan pengaruh positif terhadap kestabilan tegangan statis berdasarkan kurva P–V. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan kemampuan pembebanan sebelum mencapai *nose point*. Pada Busbar 8, kemampuan daya aktif meningkat dari sekitar 210 MW menjadi 215 MW, Busbar 9 dari 198 MW menjadi 200 MW, dan Busbar 10 dari 210 MW menjadi 215 MW. Pada batas tegangan 0,95 p.u., kemampuan pembebanan juga meningkat, masing-masing dari 70 MW menjadi 73 MW pada Busbar 8, 58 MW menjadi 61 MW pada Busbar 9, dan 65 MW menjadi 70 MW pada Busbar 10.

Penambahan beban 100% cenderung mengurangi margin kestabilan tegangan, karena sistem mencapai batas kestabilannya pada kemampuan pembebanan yang lebih rendah dibandingkan kondisi tanpa penambahan beban. Namun, ketika PLTS 4,2 MWp diintegrasikan pada kondisi tersebut, kemampuan sistem dalam mempertahankan kestabilan tegangan kembali meningkat. Hal ini menunjukkan bahwa PLTS dapat membantu meningkatkan margin kestabilan sistem ketika menghadapi peningkatan pembebanan.

Hasil analisis kurva Q–V menunjukkan bahwa sistem masih memiliki kemampuan mempertahankan kestabilan tegangan terhadap kebutuhan daya reaktif. Pada hasil simulasi, kebutuhan daya reaktif minimum berada di sekitar –33 hingga –35 MVar sesuai kondisi dan bus yang dianalisis. Perubahan beban tidak menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap margin daya reaktif, sehingga sistem masih mampu mempertahankan kondisi tegangan yang stabil.

Hasil analisis kestabilan tegangan dinamis menunjukkan bahwa integrasi PLTS 4,2 MWp tidak menyebabkan sistem menjadi tidak stabil. Ketika diberikan gangguan *short circuit* maupun kenaikan beban, tegangan mengalami penurunan sesaat tetapi kemudian kembali menuju kondisi tunak tanpa menunjukkan osilasi berkepanjangan. Pada Busbar 8 dan

Busbar 9, respons setelah integrasi PLTS juga menunjukkan fluktuasi yang relatif kecil. Sementara itu, pada Busbar 10 saat terjadi kenaikan beban, sistem tetap mampu memulihkan tegangan menuju kondisi stabil.

Secara keseluruhan, integrasi PLTS 4,2 MWp memberikan pengaruh yang positif terhadap kestabilan sistem kelistrikan Nusa Penida, terutama dalam meningkatkan margin kestabilan tegangan statis dan mempertahankan kemampuan sistem untuk kembali stabil setelah terjadi gangguan dinamis. Meskipun integrasi PLTS menyebabkan sedikit perubahan atau penurunan profil tegangan pada kondisi *steady-state*, seluruh tegangan tetap berada dalam batas operasi yang diizinkan. Dengan demikian, PLTS 4,2 MWp dapat diintegrasikan pada sistem kelistrikan Nusa Penida tanpa memberikan dampak negatif terhadap kestabilan tegangan sistem berdasarkan skenario simulasi yang dilakukan.

PERNYATAAN

Pernyataan Penggunaan Kecerdasan Artifisial

Dalam penyusunan artikel ilmiah ini, penulis menggunakan ChatGPT dan Gemini sebagai alat bantu dalam proses penulisan, khususnya untuk pemeriksaan tata bahasa, penyuntingan, perbaikan struktur kalimat, dan penyempurnaan redaksi. Seluruh proses penelitian, pengolahan dan analisis data, interpretasi hasil penelitian, serta penarikan kesimpulan dilakukan dan diverifikasi oleh penulis. Penulis bertanggung jawab sepenuhnya terhadap substansi, keakuratan, orisinalitas, dan integritas ilmiah artikel ini.

Kontribusi Penulis

Penulis bertanggung jawab penuh terhadap seluruh tahapan penelitian, yang mencakup perumusan permasalahan, penentuan metodologi, pengumpulan dan pengolahan data, analisis serta interpretasi hasil penelitian, hingga proses penyusunan dan penyuntingan artikel.

Pendanaan

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan dari pihak eksternal.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan yang berkaitan dengan penelitian dan publikasi artikel ini.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2024,” International Energy Agency, Paris, France, 2024.
- [2] International Renewable Energy Agency, “World Energy Outlook 2024,” International Energy Agency, Paris, France, 2024.

- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2024," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-handbook-of-energy-and-economic-statistics-of-indonesia-2024.pdf>
- [4] PT PLN (Persero), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025–2034," PT PLN (Persero), Jakarta, Indonesia, 2025. [Online]. Available: <https://jdih.esdm.go.id/dokumen/download?id=2025abskmesdm188k.pdf>
- [5] PT PLN (Persero), "Laporan Pengembangan Energi Terbarukan Indonesia," PT PLN Indonesia Power, Jakarta, Indonesia, 2024. [Online]. Available: <https://www.plnindonesiapower.co.id>
- [6] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, "Indonesia Energy Transition Outlook 2025," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Jakarta, Indonesia, 2025.
- [7] M. A. Hannan, M. Ker, P. J. Ker, M. S. A. Rahman, A. Mansor, and M. Muttaqi, "Voltage Stability Assessment in Renewable-Rich Power Systems," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 78452–78468, 2023.
- [8] H. Bevrani, T. Ise, and Y. Miura, "Renewable Energy Integration and Grid Stability Challenges," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 188, p. 113781, 2024.
- [9] P. S. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power System Stability and Control Applications*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2022.
- [10] M. Farrokhbadi *et al.*, "Microgrid Stability Definitions, Analysis, and Examples," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 35, no. 1, pp. 13–29, 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2925703.
- [11] IEEE Power & Energy Society, "IEEE Std 3002.7-2022: Recommended Practice for Conducting Voltage Stability Analysis of Electric Power Systems," Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Piscataway, NJ, USA, 2022.
- [12] A. Monticelli and F. Milano, "Voltage Stability Monitoring in Modern Power Systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 158, p. 109826, 2025.
- [13] X. Liang, Y. Wang, and L. Xu, "Dynamic Voltage Stability Evaluation for Renewable Integrated Power Systems," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54112–54129, 2024.
- [14] S. S. Reddy and P. R. Bijwe, "PV Curve Based Voltage Stability Analysis of Power Systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 221, p. 109401, 2023.
- [15] A. M. Eltamaly, H. Rezk, and M. Alotaibi, "Reactive Power Margin Assessment Using Q–V Curves," *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4685, 2023.
- [16] A. K. Singh and B. Das, "Voltage Stability Enhancement in Distribution Networks with PV Systems," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 58, p. 103442, 2023.
- [17] R. K. Varma and M. A. Rahman, "Reactive Power Support Techniques for Voltage Stability Improvement," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 31441–31457, 2024.
- [18] A. A. Salam and M. A. Hossain, "Dynamic Response of Grid-Connected PV Systems During Disturbances," *Energies*, vol. 17, no. 3, p. 1228, 2024.
- [19] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2022.