

DESAIN SISTEM ANALISA KESTABILAN SISTEM TEGANGAN TENAGA LISTRIK DENGAN MEMPERHITUNGGAN KETIDAK PASTIAN *RENEWABLE ENERGI SOURCES (RES)* DAN BEBAN PADA SISTEM KELISTRIKAN LOMBOK

Muhammad Rafi Ramadhani Liesanto¹, Awan Uji Krismanto², Ni Putu Agustini³
Institut Teknologi Nasional Malang, Malang Indonesia.

¹rafim1797@gmail.com, ²awan_uji_krismanto@lecturer.itn.ac.id, ³ni_putu_agustini@lecturer.itn.ac.id

Abstrak— Dalam beberapa dekade terakhir, ketergantungan dunia terhadap energi listrik meningkat seiring perkembangan teknologi dan kebutuhan industri serta rumah tangga. Tantangan utama dalam pengoperasian sistem tenaga listrik adalah menjaga kestabilan tegangan untuk memastikan keandalan dan kualitas pasokan listrik, yang diperlukan untuk menghindari gangguan sistem yang berdampak luas pada masyarakat dan ekonomi. Ketidakpastian ini menambah tantangan dalam pengelolaan sistem tenaga listrik, di mana fluktuasi *output* dari pembangkit listrik tenaga surya dapat menyebabkan variasi tegangan yang signifikan. Analisis ini diharapkan menemukan metode untuk meningkatkan kestabilan tegangan, sehingga sistem tenaga listrik dapat beroperasi lebih andal meskipun menghadapi ketidakpastian dari sumber energi terbarukan dan variasi beban. Penelitian ini bertujuan Mengalasis dampak kelistrikan sebelum pemasangan PLTS dan sesudah pemasangan PLTS pada sistem Transmisi Lombok dengan memahami bagaimana ketidakpastian dari energi surya dan beban mempengaruhi kestabilan tegangan. Pengujian ini dilakukan menggunakan sistem transmisi Lombok

Kata Kunci : Kestabilan tegangan, dampak PLTS, deviasi tegangan.

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Sistem akan memasuki keadaan ketidakstabilan tegangan ketika terjadi gangguan, peningkatan permintaan beban dan adanya perubahan kondisi sistem. Keadaan tersebut akan menyebabkan penurunan performa sistem, sehingga tegangan menjadi tidak terkendali, akibatnya profil tegangan menurun dan kerugian daya (Losses) pada sistem distribusi semakin besar, akibat fatal dari kondisi tersebut adalah terjadinya pemadaman atau blackout pada daerah sekitar.[1] Kestabilan tegangan berkaitan dengan kemampuan

sebuah sistem tenaga listrik dalam mempertahankan tegangan di setiap bus pada kondisi normal setelah terjadinya gangguan. [2]

Dalam satu dekade terakhir, sumber daya energi terbarukan telah menjadi isu penting untuk menyediakan pasokan energi yang cukup untuk beban. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, angin dan matahari memimpin pertumbuhan energi terbarukan yang terpasang di jaringan sistem tenaga listrik [2].

Terlepas dari keuntungan memasang energi terbarukan dalam jaringan sistem tenaga listrik, fitur ketidakpastian dan intermiten dari pembangkit listrik berbasis energi terbarukan mengakibatkan pengoperasian dan pengendalian sistem tenaga listrik menjadi lebih kompleks. Untuk memastikan konservasi energi, kebutuhan listrik yang bervariasi terhadap waktu harus terus disesuaikan dengan pembangkitan listrik . [2]

Pada pengoperasian sistem tenaga listrik, stabilitas tegangan daya merupakan aspek penting yang harus dipertimbangkan. Sistem tenaga listrik dioperasikan untuk tujuan mempertahankan daya saluran dan tegangan pada masing - masing bus berada pada batas operasinya. Perubahan daya reaktif merupakan salah satu penyebab tidak stabilnya tegangan pada system [3].

Tingkat penetrasi pembangkit listrik terdistribusi berdasarkan sumber daya energi terbarukan (RES) telah meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh pesatnya perkembangan perangkat elektronika daya dan teknologi material untuk memanfaatkan listrik dari sumber daya alam. Di antara berbagai jenis RES, tenaga surya dan angin merupakan sumber yang populer untuk menghasilkan listrik dalam jumlah besar karena fleksibilitas dan perkembangan teknologinya

Keandalan sistem tenaga listrik juga perlu diperhatikan agar tidak merugikan pengiriman tenaga listrik hingga kekonsumen, dalam hal ini dapat mengacu pada beberapa faktor yang harus diperhatikan adalah kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi, dan gelombang harmonik. Oleh karena itu studi ini membahas tentang analisa pengaruh integrasi Pembangkit Tenaga Surya terhadap kestabilan tegangan sistem transmisi Lombok menggunakan software Power Factory DigSilent.

B. Rumusan Masalah

1. Kestabilan tegangan sebelum pemasangan PLTS (pembangkit listrik tenaga surya)
2. Setelah pemasangan PLTS ketika diberikan simulasi Pemasangan 2 PLTS Sengkol dan PLTS Pringgabaya
3. Apa dampak kombinasi ketidakpastian dari sumber energi angin dan variasi beban terhadap kestabilan tegangan sistem tenaga listrik?

C. Tujuan

1. Mengalisis dampak kelistrikan sebelum pemasangan PLTS dan sesudah pemasangan PLTS pada sistem Transmisi Lombok.
2. Menganalisis keestabilan tegangan setiap bus sebelum dan sesudah pemasangan PLTS
3. Menganalisis pengaruh variasi beban listrik terhadap kestabilan tegangan.

II. KAJIAN PUSTAKA

A. Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan tegangan mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tegangan yang stabil di seluruh titik penghubung (bus) dalam jaringan, bahkan setelah mengalami gangguan atau perubahan kondisi operasi. Kemampuan ini sangat penting untuk memastikan kelangsungan operasi sistem yang andal dan mencegah kerusakan pada peralatan listrik [3]. Gangguan yang memengaruhi kestabilan tegangan dapat berupa perubahan beban secara mendadak, kehilangan elemen jaringan seperti generator atau saluran transmisi, hingga gangguan eksternal seperti cuaca ekstrem. Oleh karena itu, analisis kestabilan tegangan menjadi bagian integral dari perencanaan dan pengoperasian sistem tenaga listrik untuk menjaga kualitas pasokan daya serta meminimalkan risiko kegagalan sistem.. Hal ini mencakup kemampuan sistem untuk mempertahankan tegangan dalam batas yang aman dan diinginkan di setiap titik distribusi, baik dalam kondisi normal maupun setelah adanya gangguan, seperti pemadaman sebagian pembangkit, gangguan pada saluran transmisi, atau perubahan beban secara mendadak.

Kestabilan tegangan memainkan peran vital dalam menjamin pasokan listrik yang andal dan efisien. Tegangan yang terlalu rendah atau terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan listrik dan mengakibatkan gangguan pada operasi sistem secara keseluruhan. Ketidakseimbangan tegangan tidak hanya

berdampak pada kinerja komponen individual, tetapi juga dapat memicu kegagalan sistem yang lebih luas jika dibiarkan tanpa penanganan. Dengan menjaga kestabilan tegangan, operator sistem tenaga listrik dapat meminimalkan potensi kerusakan peralatan, mengoptimalkan efisiensi energi, dan memastikan bahwa pasokan daya tetap berada dalam batas yang aman bagi konsumen dan industri.[4] Dalam menghadapi gangguan, sistem tenaga harus dapat mengatur kembali distribusi daya untuk mengembalikan tegangan ke level yang stabil dengan cepat, melalui pengaturan generator, pengendalian beban, serta penggunaan peralatan pengatur tegangan seperti tap changer atau sistem kompensasi reaktif.

Kestabilan tegangan secara keseluruhan tidak hanya ditentukan oleh faktor teknis dan kualitas peralatan yang digunakan, tetapi juga oleh koordinasi dan manajemen sistem yang efektif. Agar jaringan tenaga listrik dapat beroperasi secara optimal setelah mengalami gangguan, diperlukan strategi pengelolaan yang holistik, melibatkan pemantauan real-time, respon cepat, dan penyesuaian otomatis. Pengaturan sistem yang baik memastikan bahwa setiap elemen jaringan—mulai dari pembangkit hingga beban—dapat berfungsi secara sinergis, meminimalkan dampak gangguan, dan memulihkan kestabilan dengan cepat. Pendekatan ini memungkinkan sistem untuk mengatasi perubahan kondisi dengan lebih fleksibel, menjaga keandalan dan kualitas pasokan daya yang konsisten bagi pengguna. [4].

Analisis kestabilan berdasarkan sifat dan besarnya gangguan pada umumnya digolongkan kedalam 3 jenis [4], yaitu:

1. Kestabilan Transien (Transient Stability)
2. Kestabilan Dinamis (Dynamic Stability)
3. Kestabilan Keadaan Tetap (Steady State Stability)

B. Stabilitas Tegangan

Stabilitas tegangan merujuk pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan tingkat tegangan yang stabil di seluruh jaringan, termasuk pada setiap bus atau titik penghubung, meskipun terjadi gangguan yang mengubah kondisi operasional awal. Gangguan seperti perubahan mendadak dalam beban, kerusakan peralatan, atau kehilangan pembangkit dapat menyebabkan fluktuasi tegangan yang mengganggu keseimbangan sistem. Sistem yang memiliki stabilitas tegangan yang baik dapat menanggapi gangguan ini dengan cepat, mengembalikan tegangan ke level yang aman dan sesuai standar, serta mencegah dampak buruk seperti kerusakan peralatan atau pemadaman listrik. Pengelolaan stabilitas tegangan melibatkan penerapan pengaturan otomatis dan kontrol yang cermat terhadap sumber daya pembangkit, serta distribusi daya yang efisien di seluruh jaringan. Hal ini sangat penting untuk memastikan pasokan listrik yang berkelanjutan dan berkualitas, serta mendukung keberlanjutan operasional sistem tenaga listrik dalam jangka panjang. Ketika terjadi perubahan mendadak, seperti peningkatan beban atau gangguan pada saluran transmisi, sistem dengan stabilitas tegangan yang baik dapat menyesuaikan

dengan cepat untuk mempertahankan tegangan dalam batas aman. Stabilitas tegangan sangat penting karena fluktuasi tegangan yang besar atau ketidakseimbangan dapat merusak peralatan, mengurangi efisiensi sistem, dan bahkan menyebabkan pemadaman listrik. Sistem yang stabil dilengkapi dengan pengendalian tegangan otomatis dan perangkat perlindungan yang berperan dalam menjaga kestabilan ini. Dengan mempertahankan tegangan stabil, jaringan listrik dapat beroperasi lebih andal, melayani kebutuhan konsumen secara konsisten, dan meminimalkan risiko gangguan skala besar. Gangguan tersebut bisa berupa berbagai peristiwa seperti perubahan beban, kehilangan pembangkit, pemadaman saluran transmisi, atau gangguan lainnya yang mengganggu keseimbangan antara pasokan dan permintaan daya. Suatu sistem dikatakan tegangan tidak stabil jika setidaknya satu bus dalam sistem mengalami penurunan besarnya tegangan bersamaan ketika injeksi daya reaktif diberikan pada bus yang sama. [6]

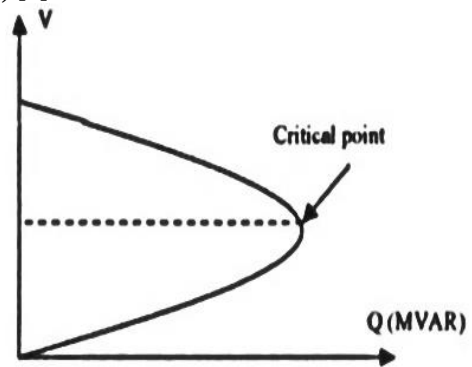
Beberapa faktor yang dapat menyebabkan jatuh tegangan antara lain:

- Panjang Kabel Penghantar
Semakin panjang kabel penghantar yang digunakan, maka semakin besar kerugian tegangan atau tegangan jatuh yang terjadi.
- Besar Arus
Semakin besar arus listrik yang mengalir pada penghantar, maka semakin besar tegangan jatuh yang terjadi.
- Tahanan Jenis (Rho)
Semakin besar tahanan jenis dari bahan penghantar yang digunakan, maka semakin besar kerugian tegangan atau tegangan jatuh yang terjadi.
- Luas Penampang Penghantar
Semakin besar ukuran luas penampang penghantar yang digunakan, maka semakin kecil kerugian tegangan atau tegangan jatuh yang terjadi.

C. Analisis Kestabilan Tegangan Berdasarkan Kurva P-V

Kurva P-V adalah grafik yang menggambarkan hubungan antara tegangan (V) dan daya aktif (P) dalam sistem tenaga listrik. Kurva ini menggambarkan bagaimana tegangan pada berbagai titik dalam jaringan dapat berubah seiring dengan peningkatan daya aktif yang dibebankan pada sistem. Ketika daya aktif yang diteruskan ke jaringan meningkat, tegangan di titik-titik tertentu dapat mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem tenaga listrik harus mampu mengatur dan menyesuaikan tegangan agar tetap stabil meskipun terjadi peningkatan beban. Analisis kurva P-V sangat penting dalam merancang dan mengoperasikan sistem tenaga listrik karena memberikan gambaran tentang batas daya yang dapat ditangani oleh sistem tanpa menyebabkan penurunan tegangan yang berisiko. Jika beban terus meningkat tanpa adanya penyesuaian yang tepat, tegangan bisa jatuh di bawah batas minimum yang diperlukan untuk operasi yang aman, yang dapat

menyebabkan gangguan atau pemadaman. Oleh karena itu, kurva ini sangat berguna untuk memantau dan mengelola kestabilan tegangan dalam jaringan listrik. Pada gambar 2 daya aktif (P) diukur pada sumbu horizontal, sementara tegangan (V) diukur pada sumbu vertikal. Kurva P-V ini sangat penting untuk menganalisis kestabilan tegangan dalam suatu sistem tenaga listrik, karena menunjukkan seberapa besar daya aktif yang dapat disuplai tanpa mengorbankan kestabilan tegangan.. Kurva ini dihasilkan dengan sederet solusi aliran daya dengan tingkat beban yang berbeda-beda. Titik kritis ketika terjadi kenaikan beban merupakan hal yang sangat penting untuk diketahui karena dapat menyebabkan jatuh tegangan (voltage collapse).[9]



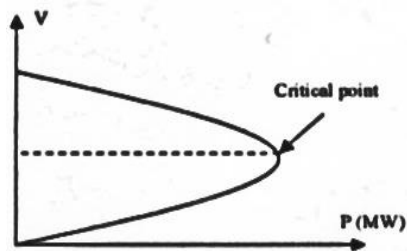
Gambar 1 Kurva P-V

Garis putus-putus pada Gambar 1 menunjukkan titik kritis, batas kapasitas beban dalam sistem tenaga listrik yang menggambarkan stabilitas tegangan. Di atas titik ini, sistem stabil dan tegangan tetap terjaga meskipun ada gangguan. Di bawah titik kritis, sistem menjadi tidak stabil, tegangan turun drastis, berpotensi menyebabkan pemadaman.

D. Kurva Q-V

Kurva Q-V adalah grafik yang digunakan untuk menganalisis hubungan antara daya reaktif (Q) dan tegangan (V) dalam sistem tenaga listrik. Kurva ini memberikan wawasan tentang bagaimana perubahan dalam aliran daya reaktif dapat memengaruhi kestabilan tegangan di jaringan. Ketika sistem mendekati kondisi kritis, perubahan daya reaktif, baik itu penambahan atau pengurangan, dapat menyebabkan fluktuasi tegangan yang signifikan. Dalam kondisi normal, daya reaktif berperan dalam mempertahankan tegangan pada tingkat yang stabil, namun jika terjadi kekurangan atau kelebihan daya reaktif, tegangan dapat turun atau naik secara drastis, yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan sistem. Kurva Q-V sangat penting untuk merancang dan mengelola pengaturan pembangkit daya reaktif, serta untuk memprediksi dan menghindari masalah kestabilan tegangan yang dapat mempengaruhi keandalan pasokan listrik. Dengan pemahaman yang tepat terhadap kurva ini, operator sistem dapat melakukan penyesuaian yang diperlukan untuk memastikan tegangan tetap dalam batas aman, bahkan di bawah kondisi beban atau aliran daya reaktif yang ekstrem. Kurva ini sangat berguna dalam simulasi untuk

memahami bagaimana fluktuasi dalam daya reaktif dapat memengaruhi kondisi tegangan di seluruh jaringan dan membantu mengidentifikasi potensi masalah terkait dengan kestabilan tegangan pada berbagai tingkat beban. Gambar 2 menunjukkan grafik titik daya reaktif terhadap tegangan pada saat tegangan menurun pada saat critical point menjelaskan sebagai batas titik kritis pengoperasian [8]



Gambar 2 Kurva Q-V

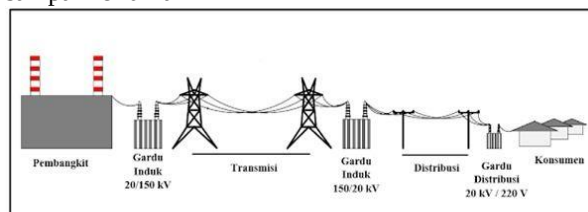
E. Pembangkit Listrik

Pembangkit listrik adalah fasilitas yang mengonversi berbagai sumber energi, seperti energi mekanik, panas, atau terbarukan, menjadi energi listrik untuk memenuhi kebutuhan berbagai sektor. Pembangkit ini menggunakan bahan bakar fosil seperti batu bara dan gas alam, energi terbarukan seperti angin dan matahari, serta energi nuklir. Proses konversi energi melibatkan penggunaan turbin atau mesin penggerak lainnya yang menghasilkan energi mekanik untuk menggerakkan rotor pada generator, yang kemudian mengubah energi mekanik menjadi listrik melalui induksi elektromagnetik.[5]

Pembangkit berbahan bakar fosil bekerja dengan cara membakar bahan bakar untuk menghasilkan uap yang menggerakkan turbin, sedangkan pembangkit tenaga air memanfaatkan energi potensial air yang jatuh untuk menggerakkan turbin. Pembangkit tenaga angin dan surya mengonversi energi angin atau cahaya matahari langsung menjadi listrik tanpa pembakaran. Semua jenis pembangkit listrik ini dirancang untuk menghasilkan listrik dalam jumlah besar, memenuhi kebutuhan masyarakat, dan mendukung industri serta sektor lainnya. Selain itu, pembangkit listrik juga memainkan peran penting dalam menjaga keseimbangan pasokan dan permintaan energi. Dengan perkembangan teknologi, fokus kini lebih pada efisiensi energi dan pengurangan dampak lingkungan, terutama pada pembangkit berbahan bakar fosil yang berusaha beralih ke solusi yang lebih ramah lingkungan. Pembangkit listrik dirancang untuk mengoptimalkan konversi energi dan mengurangi emisi karbon, berperan dalam menjaga keberlanjutan pasokan listrik yang efisien dan ramah lingkungan.

Sistem manajemen beban yang efisien, teknologi pemantauan canggih, dan pengaturan distribusi daya yang optimal menjadi kunci utama untuk menjaga kualitas pasokan listrik yang stabil. Pembangkit listrik juga harus mampu merespons cepat terhadap perubahan mendadak dalam beban atau gangguan sistem, seperti fluktuasi yang tidak terduga. Untuk mendukung keberlanjutan, pembangkit listrik semakin diarahkan

pada pemanfaatan sumber energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan, seperti tenaga surya, angin, dan biomassa. Tujuan utama pembangkit listrik adalah menyediakan pasokan energi yang stabil, andal, dan cukup untuk berbagai kebutuhan, baik rumah tangga, industri, maupun sektor lainnya. Pembangkit listrik juga harus mempertahankan kualitas daya dengan menjaga tegangan dan frekuensi yang stabil, sehingga dapat mendukung kelangsungan ekonomi dan kesejahteraan sosial. Dengan desain dan operasi yang tepat, pembangkit listrik dapat menanggapi perubahan permintaan energi secara real-time dan menjaga keberlanjutan pasokan listrik jangka panjang. [5]. Gambar 3 menunjukkan proses penyaluran energi listrik sampai ke rumah



Gambar 3 Pembangkit Listrik

F. Saluran Transmisi

Proses transmisi energi listrik mengalirkan listrik dari pembangkit ke substation distribusi dan selanjutnya ke konsumen melalui jaringan konduktor. Transmisi ini menggunakan saluran bertegangan tinggi untuk mengurangi kerugian energi selama perjalanan. [6]. Setelah mencapai substation distribusi, tegangan diturunkan sesuai dengan kebutuhan konsumen, baik untuk rumah tangga, industri, atau fasilitas komersial. Proses transmisi harus menjaga kestabilan aliran energi, termasuk pengaturan tegangan, frekuensi, dan daya agar tetap efisien dan aman. Sistem proteksi dan kontrol otomatis digunakan untuk merespons perubahan beban atau gangguan dalam jaringan dengan cepat[6].

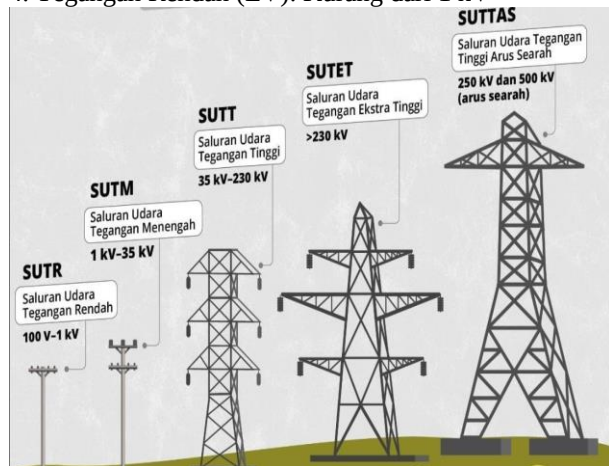
Infrastruktur transmisi meliputi saluran udara, kabel bawah tanah, dan transformer yang menyesuaikan tegangan untuk setiap titik konsumen. Dengan pengelolaan yang tepat, transmisi energi listrik memastikan pasokan yang stabil dan handal. Di Indonesia, sistem transmisi dibedakan berdasarkan tingkatan tegangan untuk mendistribusikan listrik dari pembangkit ke konsumen. Tegangan ekstra tinggi (TET) digunakan untuk mentransmisikan energi dalam jumlah besar dengan nominal 500 kV, sementara tegangan tinggi (TT) dengan nominal 70 kV dan 150 kV digunakan untuk mentransmisikan energi dalam jarak yang lebih jauh dengan efisiensi tinggi.

Sistem transmisi yang menggunakan tegangan tinggi memastikan kerugian daya minimal, sehingga pasokan listrik yang diterima konsumen tetap berkualitas. Tegangan tinggi juga digunakan untuk distribusi listrik ke wilayah tertentu yang tidak membutuhkan daya besar, tetapi memerlukan distribusi stabil. Infrastruktur transmisi ini dilengkapi dengan perlindungan dan pengawasan yang ketat untuk menjaga kelancaran operasional dan menghindari gangguan. Konstruksi sistem transmisi terdiri dari saluran udara dan kabel,

termasuk kabel laut untuk menghubungkan pulau-pulau atau negara.[7].

Gambar 4 menunjukkan pengkalisifikasian tegangan dalam transmisi yang meliputi:

1. Tegangan Ekstra Tinggi (EHV): Di atas 220 kV
2. Tegangan Tinggi (HV): 66 kV hingga 220 kV
3. Tegangan Menengah (MV): 1 kV hingga 69 kV
4. Tegangan Rendah (LV): Kurang dari 1 kV



Gambar 4 Saluran transmisi

G. Digsilent

Digsilent adalah perangkat lunak simulasi yang dirancang untuk menganalisis, merancang, dan mengelola sistem tenaga listrik. Perangkat ini memungkinkan insinyur dan perencana untuk melakukan analisis mendalam terkait kestabilan dinamis, aliran daya, proteksi, dan perencanaan jaringan. DiGSILENT memberikan wawasan berharga dalam merancang sistem yang efisien dan andal, serta mendukung optimasi sistem, penilaian risiko, dan analisis keandalan. Perangkat ini digunakan untuk perencanaan, desain, dan pengoperasian sistem tenaga listrik yang kompleks dan modern.[9]

Industri tenaga listrik telah mengalami transformasi signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Perkembangan teknologi, seperti adopsi energi terbarukan (angin, matahari, biomassa), smart grid, dan peningkatan kapasitas pembangkit, mengubah cara energi dihasilkan dan didistribusikan. Peningkatan permintaan energi dan perubahan pola konsumsi mendorong perlunya sistem distribusi yang lebih efisien dan fleksibel. Selain itu, integrasi pembangkit terdesentralisasi yang memanfaatkan energi terbarukan memperkenalkan tantangan dalam pengelolaan dan kestabilan jaringan. Sistem distribusi kini harus mengelola aliran energi yang lebih variatif dan mengoptimalkan distribusi daya. Teknologi canggih seperti pemantauan real-time, manajemen data besar, dan otomatisasi menjadi semakin penting untuk mengatasi fluktuasi pasokan energi terbarukan.[9] Jaringan mikro (microgrids) dan sistem penyimpanan energi juga digunakan untuk meningkatkan ketahanan pasokan. Transformasi ini meningkatkan kompleksitas sistem tenaga listrik, memerlukan pengelolaan yang lebih efisien, serta kesiapan menghadapi gangguan yang lebih kompleks.

DiGSILENT memainkan peran penting dalam menghadapi tantangan ini. Sebagai alat simulasi yang canggih, DiGSILENT memungkinkan analisis aliran daya, kestabilan sistem, dan perencanaan distribusi energi dengan mendalam. Perangkat ini membantu insinyur dan ahli sistem tenaga listrik untuk merancang jaringan yang lebih efisien, handal, dan resilien, dengan mempertimbangkan tantangan seperti integrasi energi terbarukan yang fluktuatif dan meningkatnya permintaan energi.[10] Dalam penelitian dan pengembangan, DiGSILENT juga memberikan kontribusi penting. Platform ini memungkinkan pengujian dan pemodelan solusi teknologi baru, seperti integrasi energi terbarukan dan peningkatan efisiensi energi. Dengan kemampuannya untuk mensimulasikan berbagai skenario operasional, DiGSILENT membantu pengembangan solusi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan aman untuk sektor energi.

H. Deviasi Tegangan

Deviasi tegangan mengacu pada situasi di mana tegangan dalam sistem tenaga listrik mengalami perubahan yang tidak stabil atau fluktuasi yang tidak teratur. Kondisi ini dapat memengaruhi kinerja peralatan listrik dan mengganggu kestabilan sistem tenaga secara keseluruhan.[11]. Penyimpangan tegangan yang signifikan sering kali disebabkan oleh faktor-faktor seperti beban yang bervariasi, gangguan jaringan, atau ketidakseimbangan daya. Untuk menjaga stabilitas dan keandalan sistem, penting dilakukan pemantauan dan pengaturan tegangan secara terus-menerus agar tetap berada dalam batas yang diizinkan. Fenomena ini dapat mengakibatkan fluktuasi tegangan yang melampaui batas-batas normal yang telah ditentukan, sehingga berpotensi mempengaruhi kinerja peralatan listrik dan kestabilan operasional sistem secara keseluruhan. [11]. Deviasi tegangan dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti gangguan (fault) startig beban besar, intermittent losse connection pada kabel, dan variasi tegangan durasi pendek (short duration voltage variation) yang meliputi interruption, sag, dan swell.

Deviasi tegangan dapat berupa:

- a) Fluktuasi tegangan (Voltage Fluctuation): perubahan tegangan secara random antara $0,9 p.u$ - $1,1 p.u$, yang dapat menyebabkan flicker.
- b) Deviasi frekuensi daya (Power Frequency Deviation): deviasi dari frekuensi dasarnya, dengan deviasi yang diizinkan sebesar $0,5 \text{ Hz}$.
- c) Harmonik: gangguan bentuk gelombang tegangan atau arus yang bukan sinusoidal murni lagi, disebabkan oleh adanya beban non-linear.
- d) Ketidakseimbangan tegangan (Voltage Unbalance): deviasi maksimum dari rata-rata tegangan arus tiga fasa, dinyatakan dalam persen dengan deviasi yang diizinkan sebesar $0,5$ sampai dengan 2%
- e) Deviasi tegangan biasanya dihitung untuk memahami seberapa besar penyimpangan tegangan dari nilai rata-ratanya. Rumus untuk deviasi standar adalah sebagai berikut:
 - 1) Hitung rata-rata tegangan ($\bar{V}$);

$$\bar{V} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (1)$$

Dimana:

N jumlah data tegangan

V_i adalah nilai tegangan ke- i

2) Hitung Variasi (σ^2);

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2 \quad (2)$$

3) Hitung Deviasi Standar (σ);

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2} \quad (3)$$

Secara sederhana, rumus deviasi tegangan dapat ditulis sebagai:

$$\Delta V = \frac{V_{\text{nominal}} - V_{\text{aktual}}}{V_{\text{nominal}}} \times 100\% \quad (4)$$

III. METODE PENELITIAN

A. Lokasi Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data example jaringan interkoneksi 27 Bus, data jaringan interkoneksi Lombok, data beban tersalurkan, dan single line diagram interkoneksi Lombok, data lama waktu penyinaran matahari. Yang kemudian disimulasikan pada software DigSILENT PowerFactory 15.1. Sistem kelistrikan yang di gunakan untuk penelitian ini adalah sistem kelistrikan Lombok yang terdiri dari 19 unit pembangkit, yang beroperasi pada tegangan 150 kV, serta terdiri dari 27 Bus dan 19 saluran yang terhubung dengan pusat-pusat beban.

Data diambil data example jaringan interkoneksi 14 Bus, data jaringan interkoneksi Lombok, data beban tersalurkan, dan single line diagram interkoneksi Lombok, data lama waktu penyinaran matahari, data yang didapatkan meliputi :

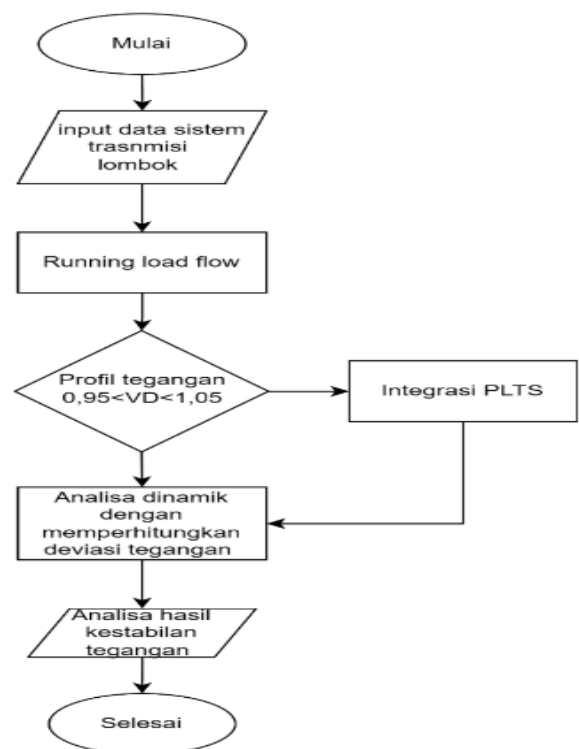
1. Data Single Line Diagram
2. Data Pembangkit
3. Data Saluran
4. Data Beban
5. Analisis aliran daya pada sistem bertujuan untuk mengetahui kinerja dan kondisi aliran daya dalam keadaan tertentu.
6. Hasil simulasi digunakan untuk menganalisa kestabilan tegangan pada sistem transmisi Lombok, dengan menyelidiki.
7. Integrasi PLTS dan kondisi pembebanan: Untuk menyelidiki kondisi kestabilan tegangan dari sistem dengan adanya Integrasi PLTS. tegangan pada setiap bus sistem transmisi Melakukan input data Beban, data Pembangkit, data Saluran dan data Generator yang sesuai dengan data yang diperoleh dari PLN.

B. Diagram Alir

Diagram alir menjelaskan tentang alur Simulasi Real dengan menggunakan Sistem Kelistrikan Lombok (27 Bus).

1. Menggambar single line dan input data sistem kelistrikan Lombok
2. Simulasi Load Flow pada base sistem kelistrikan Lombok untuk melihat aliran daya pada sistem
3. Dilakukan pemasangan 2 PLTS pada sistem kelistrikan Lombok
4. Simulasi Load Flow dan probabilitas pada sistem kelistrikan Lombok
5. Melakukan perbandingan hasil analisa kestabilan tegangan pada saat pemasangan 2 PLTS
6. Selesai.

C. Flowchart



Gambar 5 Flowchart

IV. HASIL DAN ANALISIS

A. Single Line Diagram Lombok

Analisis aliran daya pada sistem bertujuan untuk mengetahui kinerja dan kondisi aliran daya dalam keadaan tertentu. Analisa kestabilan dinamik dengan memperhitungan deviasi tegangan yang disebabkan oleh variasi beban, bertujuan untuk mlihat kondisi profil tegangan pada sistem Lombok.

Hasli simulasi aliran daya dari Single Line Diagram system kelistrikan Lombok menggunakan software DigSILENT, Pada system kelsitrikan Lombok, dilakukan analisa aliran daya (load flow) dengan tujuan untuk mengetahui kinerja dan kondisi aliran daya dalam keadaan tertentu. Sistem kelistrikan Lombok terdiri dari

19 unit pembangkit, yang beroperasi pada tegangan 150 kV, serta terdiri dari 27 bus dan 19 saluran yang terhubung dengan pusat-pusat beban, serta data dinamik generator dan eksitasi generator. Setelah inetgrasi PLTS Untuk melihat pengaruhnya terhadap profil tegangan maka dilakukan kembali analisa aliran daya. Analisa yang akan dilakukan sebagai berikut:

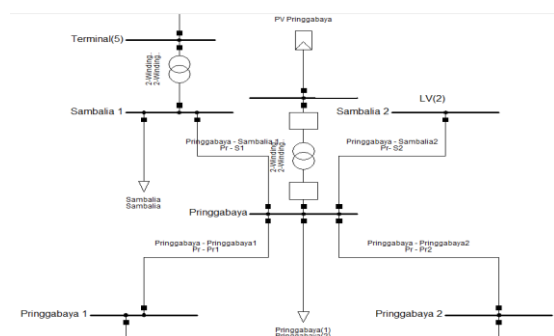
1. Stabilitas Sistem

- Stabilitas Dinamis: Memeriksa apakah integrasi PLTS mempengaruhi stabilitas dinamis sistem, terutama dalam menghadapi variasi beban dan perubahan kondisi operasi.
- Pengaruh Radiasi Matahari: Menilai dampak radiasi matahari terhadap stabilitas tegangan dan kestabilan keseluruhan system

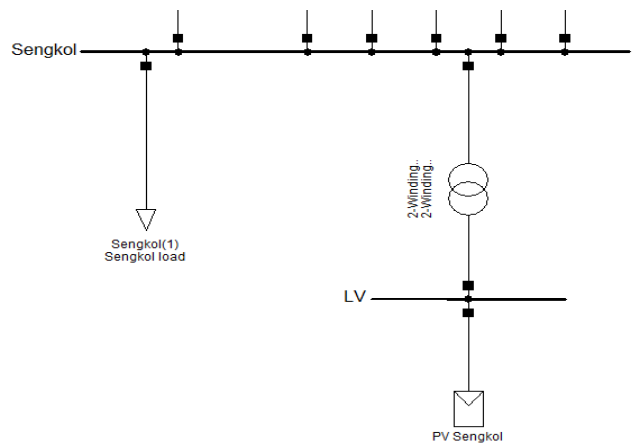
2. Evaluasi Tegangan:

- Tegangan Pasca Integrasi: Menganalisa apakah integrasi PLTS di Jeneponto dan Sidrap mampu meningkatkan tegangan.
- Perbandingan Tegangan: Membandingkan profil tegangan pada berbagai bus sebelum dan sesudah integrasi PLTS untuk melihat dampak keseluruhan pada sistem transmisi Lombok.
- Setelah melakukan analisa-analisa tersebut, diharapkan dapat memperoleh solusi yang tepat untuk meningkatkan kestabilan dan efesiensi saluran system transmisi Lombok secara keseluruhan.

Gambar 6 dan 7 dibawah ini menunjukan lokasi pemasangan PLTS Pringgabaya dan Sengkol



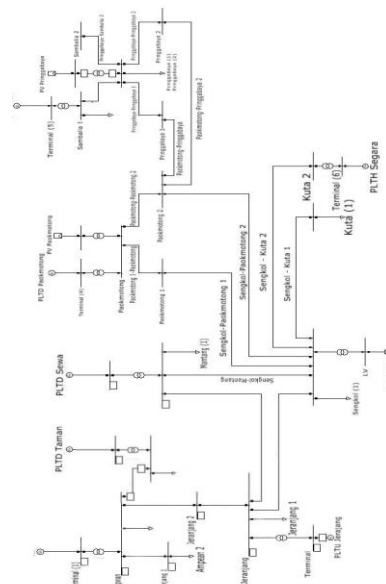
Gambar 6 PLTS Pringgabaya



Gambar 7 PLTS Sengkol

B. Data Jaringan Lombok

Sistem kelistrikan Lombok pada gambar 8 terdiri dari 7 unit pembangkit, yang beroperasi pada tegangan 150 kV, serta terdiri dari 17 bus dan 19 saluran yang terhubung dengan pusat-pusat beban, serta data dinamik generator dan eksitasi generator, Single Lane Diagram kelistrikan Lombok dapat dilihat pada gambar 8



Gambar 8 Single lane Diagram Lombok

1. Data Paramater Generator

Data Parameter generator untuk setiap pembangkit ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2 , yang meliputi data dinamik generator dan eksitasi.

Tabel 1 Data Generator

No	Pembangkit	X_d (pu)	X_d' (pu)	X_d'' (pu)	X_q (pu)	X_q' (pu)	X_q'' (pu)
1	PLTD Ampenan	2	0,3	0,2	2	0,3	0,2
2	PLTD Taman	2	0,3	0,2	2	0,3	0,2
3	PLTU Jeranjang	2	0,3	0,2	2	0,3	0,2
4	PLTD Sewa	2	0,3	0,2	2	0,3	0,2
5	PLTD Paokmotong	2	0,3	0,2	2	0,3	0,2
6	PLTMH Segara	2	0,3	0,2	2	0,3	0,2
7	PLTMH	2	0,3	0,2	2	0,3	0,2

Tabel 2 Data Eksitasi Generator

No	Nama Pembangkit	K_A (pu)	TA	$V_{A_{max}}$	$V_{A_{min}}$
1	PLTD Ampenan	1	0,02	1	-1
2	PLTD Taman	1	0,02	1	-1
3	PLTU Jeranjang	1	0,02	1	-1
4	PLTD Sewa	1	0,02	1	-1
5	PLTD Paokmotong	1	0,02	1	-1
6	PLTMH Segara	1	0,02	1	-1
7	PLTMH	1	0,02	1	-1

2. Data Saluran

Saluran transmisi pada sistem Sulselbar terdiri dari 19 saluran transmisi yang menghubungkan pusat-pusat pembangkit dan beban pada sistem kelistrikan Lombok pada tabel 3 yang terdiri dari data Impedansi saluran.

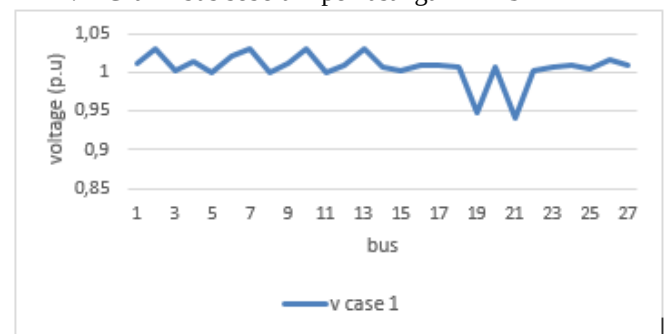
Tabel 3 Data Saluran

No	Saluran	Urutan Positif ($\Omega/1$)			Jarak (km)
		R	Y	Z	
1.	Ampenan – Jeranjang 1	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	3,5
2.	Ampenan – Jeranjang 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	7,5
3.	Ampenan – Jeranjang 1	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	3,5
4.	Ampenan – Jeranjang 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	7,5
5.	Mantang – Jeranjang	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	36
6.	Pringgabaya – Sambalia 1	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	15
7.	Pringgabaya – Sambalia 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	15
8.	Sengkol – Jeranjang	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	40,166
9.	Sengkol – Mantang	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	32,1
10.	Sengkol – Paokmotong 1	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	38,9
11.	Sengkol – Paokmotong 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	38,9
12.	Sengkol – Kuta 1	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	11,8

13.	Sengkol – Kuta 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	11,8
14.	Paokmotong – Pringgabaya 1	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	17,9
15.	Paokmotong – Pringgabaya 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	17,9
16.	Pringgabaya – Pringgabaya 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	1,4
17.	Pringgabaya – Pringgabaya 1	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	1,3
18.	Jeranjang – Jeranjang 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	3,5
19.	Ampenan – Taman	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	5,1
20.	Paokmotong – Paokmotong 1	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	2,5
21.	Paokmotong – Paokmotong 2	0,4057 4	0,82 9	0,35 28	2,3

C. Analisa Bus Sebelum Dan Setelah Pemasangan PLTS

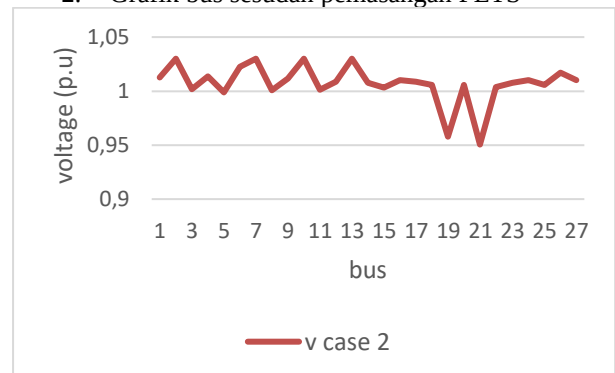
1. Grafik bus sebelum pemasangan PLTS



Gambar 9 Grafik bus sebelum pemasangan PLTS

Pada gambar 9 grafik diatas dapat dijelaskan bahwa sebelum pemasangan PLTS Pringgabaya dan PLTS sengkol, tegangan pada bus 19 (LV) dan bus 21 (LV2) dengan nilai tegangan pada bus 19 adalah 0,947824 dan pada bus 21 adalah 0,940442 Pada bus yang lain tidak mengalami undervoltage.

2. Grafik bus sesudah pemasangan PLTS

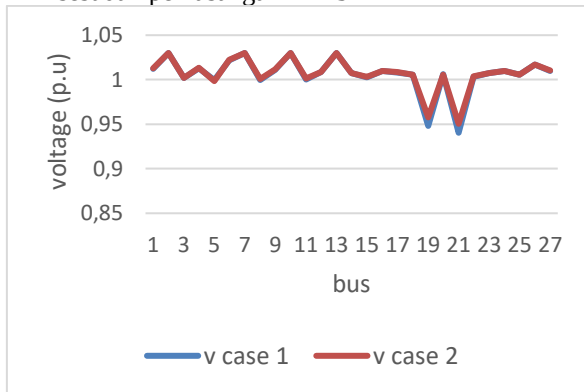


Gambar 10 Grafik bus sesudah Pemasangan PLTS

Pada gambar 10 grafik diatas dapat dijelaskan bahwa tegangan pada bus 19 dan bus 21 yang sebelum pemasangan mengalami undervoltage, setelah adanya

pemasangan PLTS Pringgabaya dan PLTS Sengkol, tegangan pada bus 19 (LV) dan bus 21(LV2) mengalami peningkatan tegangan dengan nilai tegangan 0,957583 pada bus 19, dan pada bus 21 nilai tegangan naik ke 0,950511

Hasil perbandingan keseluruhan bus sebelum dan sesudah pemasangan PLTS



Gambar 11 Perbandingan keseluruhan bus sesebelum dan sesudah pemasangan PLTS

Pada gambar 11 grafik diatas menunjukkan perbandingan keseluruhan dari bus sistem transmisi Lombok sebelum pemasangan PLTS dan sesudah pemasangan PLTS.

D. Analisa Deviasi Tegangan Pada Sistem Transmisi Lombok

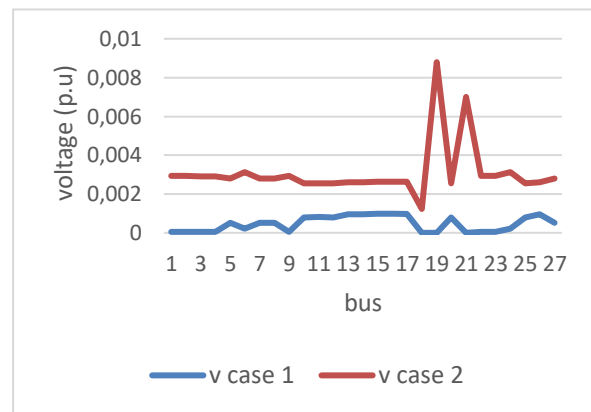
Tabel 4 dibawah ini menunjukkan hasil rata rata tegangan pada sistem Lombok dari variasi beban dan generator

Tabel 4 Data deviasi tegangan

No	Nama Bus	Std deviasi case 1	Std deviasi case 2
1.	Ampenan	5,9475E-05	0,00293049
2.	Jeranjang 1	5,9527E-05	0,00293307
3.	Jeranjang 2	5,9278E-05	0,00292067
4.	Jeranjang	5,9184E-05	0,00291584
5.	Sengkol	0,00052295	0,00279679
6.	Mantang	0,00022174	0,00312219
7.	Kuta 1	0,00052464	0,00280581
8.	Kuta 2	0,00052281	0,00279613
9.	Taman	5,9546E-05	0,00293404
10.	Paokmotong 1	0,0007797	0,00254884
11.	Paokmotong 2	0,00081585	0,00254131
12.	Paokmotong	0,00079825	0,00254308
13.	Pringgabaya 2	0,00096301	0,00261701
14.	Pringgabaya 1	0,00096223	0,0026161
15.	Pringgabaya	0,00097388	0,0026298
16.	Sambalia 1	0,0009737	0,00262931
17.	Sambalia 2	0,00097388	0,0026298

18.	Terminal	0	0,0012321
19.	LV	0	0,00879589
20.	LV(1)	0,00079884	0,00254488
21.	LV(2)	0	0,00700634
22.	Terminal(1)	5,9393E-05	0,00292637
23.	Terminal(2)	5,9546E-05	0,00293404
24.	Terminal(3)	0,0002218	0,0031227
25.	Terminal(4)	0,000799	0,00254535
26.	Terminal(5)	0,00096998	0,00261954
27.	Terminal(6)	0,00052293	0,00279674

E. Data Beban dan Pembangkit



Gambar 12 Deviasi tegangan

Pada gambar 12 menunjukan grafik perbandingan deviasi tegangan pada bus- bus sistem transmisi Lombok. Dapat dilihat dari gambar dan Tabel, bahwa setelah pemasangan PLTS kedalam sistem terjadi kenaikan deviasi tegangan. Hal ini disebabkan karena variasi beban dan ketidakpastian sinar radiasi dari PLTS sehingga, output daya dari PLTS bervariasi dan tidak tetap. Namun meskipun demikian, dilihat dari gambar grafik menunjukan bahwa deviasi yang terjadi sebelum pemasangan PLTS dan setelah pemasangan PLTS masih dalam kondisi yang aman, atau tidak melebihi standar. Sehingga hal ini bisa dikatakan bahwa adanya pemasangan PLTS Pringgabaya dan PLTS Sengkol masih dapat mempertahankan kestabilan sistem tegangan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Beban yang tinggi dapat menyebabkan tegangan turun, dan beban yang rendah dapat menyebabkan tegangan naik. Selama beban puncak, kebutuhan daya tinggi dan penurunan tegangan yang signifikan dapat terjadi.
2. Fluktuasi beban pada beban Pringgabaya dan beban Sengkol dapat mempengaruhi kestabilan sistem kelistikan Lombok. Fluktuasi beban ini menyebabkan terjadinya penyimpangan

tegangan pada sistem transmisi tenaga listrik di Lombok

3. Integrasi PLTS dapat meningkatkan profil tegangan bus kritis yang mengalami undervoltage
4. Diperkenalkannya PLTS pada sistem Lombok menyebabkan deviasi tegangan dapat terjadi karena fluktuasi dan ketidakpastian radiasi
5. Perbandingan simpangan tegangan sebelum dan sesudah dipasang PLTS Pringgabaya dan Sengkol masih dalam batas aman jika nilai deviasi tidak melebihi 1%.
6. Setelah masuknya PLTS Pringgabaya dan PLTS Sengkol ke dalam jaringan listrik Lombok, dapat terjadi peningkatan tegangan dan perbaikan profil tegangan sistem,
7. Adanya PLTS di dua tempat yaitu Pringgabaya dan Sengkol, dapat menaikkan tegangan pada sistem kelistrikan Lombok lebih tepatnya pada bus 19 (LV) dan bus 21 (LV2)

B. Saran

Untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan 3 PLTS pada sistem jaringan Lombok, dan juga bisa menggunakan software lain seperti software MATLAB untuk menganalisa grafik, dan perbandingan.

VI. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hamid et al. - 2019 - Analisa Drop Tegangan Sambungan Rumah Pada Saluran.pdf.
- [2] L. M. Putranto, S. P. Hadi, and R. P. Aridani, "Pengaruh Penempatan Unified Power Flow Controller Terhadap Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik," 2017
- [3] M. EL-Shimy, M. A. L. Badr, and O. M. Rassem, Impact of large scale wind power on power system stability. 2018.
- [4] P. Kundur, "Voltage Stability, Power System Stability and Control". 959-1019. New York : McGraw-Hill 2020
- [5] Ramadhan, A, "Analisis Stabilitas Tegangan Pada Jaringan Distribusi Radial Tiga Fasa Tak Seimbang", Digilib.ITS, Surabaya 2014
- [6] B. Gao, G. K. Morison, and P. Kundur, "Voltage Stability Evaluation using Modal Analysis," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 12, no. 11, p. 41, 2019.
- [7] C. W. Winanti, "Analisis Statis dan Dinamis Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Listrik CNOOC SES Ltd.," 2019
- [8] C. Reis, A. Andrade, and F. P. Maciel, "Voltage stability analysis of electrical power system," *POWERENG 2019 - 2nd Int. Conf.*
- [9] Marwan. 2019. Simulasi Sistem Tenaga Listrik Menggunakan DiGILENT. Yogyakarta: Andi.
- [10] Prayoga, A. B., & Suprianto, B. (2023). Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Pada Transformator Distribusi Terhadap Rugi Daya

(Losses) Dengan Digsilent Power Factory di PT.PLN (Persero) ULP Ngunut.

- [11] Usman, Adil Amin, Muhammad Muneer A., H. Mokhlis. 2018."Optimal Under Voltage Load Shedding Scheme for a Distribution Network Using EPSO algorithm". Jurnal IEEE.
- [12] Denis, E. W. Sinuraya, J. Windarta, Y. A. A. Soetrisno, and K. Fernanda, "Analysis of Performance and Control of DC Microgrids as Electricity Providers for Renewable Energy," *E3S Web Conf.*, vol. 317, p. 04032, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202131704032.

VII. BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di kabupaten Tulungagung pada tanggal 01 Desember 2001 . dengan nama Muhammad Rafi Ramadhani Liesanto. Menempuh pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan di SMKN 1 Rejotangan Tulungagung dari tahun 2017 hingga tamat di tahun 2020. Kemudian setelah menamatkan SMK, penulis melanjutkan pendidikannya ke jenjang Strata 1 di kampus unggulan di kota malang, yaitu Institut Teknologi Nasional Malang. Penulis memilih program studi teknik elektro dengan konsentrasi energi listrik. sehingga sesuai dengankonsentrasi atau keahlian yang dipilih, maka penulis berharap dengan penelitian yang berjudul "Analisis Kestabilan Tegangan Sistem Tenaga Listrik Dengan Memperhitungkan Ketidakpastian Renewable Energi Sources (RES) dan Beban" dapat memberikan kontribusi yang baik untuk pembaca dalam memperluas pengetahuan di bidang kelistrikan.