

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, dan teknologi yang mendorong transformasi sistem tenaga listrik menuju pemanfaatan energi yang lebih berkelanjutan. Di sisi lain, komitmen global dalam mengurangi emisi gas rumah kaca menjadi faktor pendorong utama dalam percepatan transisi energi dari sumber berbasis fosil menuju energi baru terbarukan (EBT) [1]. Di Indonesia, upaya ini diperkuat melalui Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 112 Tahun 2022 yang menargetkan percepatan integrasi energi baru terbarukan dalam sistem ketenagalistrikan nasional guna mencapai net zero emission pada tahun 2060 [2]. Salah satu sumber energi terbarukan yang berkembang pesat adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis *photovoltaic* (PV) [3].

Meningkatnya penetrasi PLTS dalam sistem tenaga listrik tidak hanya dilakukan melalui penambahan pembangkit baru, tetapi juga dapat terjadi melalui pengurangan peran atau penggantian sebagian pembangkit konvensional berbasis generator sinkron [4]. Kondisi ini sejalan dengan arah transisi energi yang mendorong berkurangnya ketergantungan terhadap pembangkit berbahan bakar fosil dan meningkatnya kontribusi pembangkit berbasis inverter. Meskipun mampu menyediakan energi listrik yang bersih dan berkelanjutan, karakteristik operasi PLTS berbeda dengan generator sinkron sehingga berpotensi memengaruhi kinerja sistem tenaga listrik, khususnya pada aspek stabilitas tegangan [5]. Generator sinkron tidak hanya menghasilkan daya aktif, tetapi juga menyediakan daya reaktif serta dukungan regulasi tegangan melalui sistem eksitasinya sehingga berperan penting dalam menjaga profil tegangan sistem [6]. Sebaliknya, pada penelitian ini PLTS dimodelkan beroperasi pada faktor daya satu (*unity power factor*), sehingga hanya menyuplai daya aktif tanpa memberikan kontribusi daya reaktif kepada sistem.

Pergantian generator sinkron dengan PLTS menyebabkan ketersediaan daya reaktif lokal berkurang sehingga sistem menjadi lebih bergantung pada pasokan daya reaktif dari sumber lain yang lokasinya lebih jauh [7]. Kondisi ini dapat meningkatkan aliran daya reaktif pada jaringan transmisi, memperbesar rugi-rugi daya (*reactive power losses*), serta menyebabkan penurunan profil tegangan pada bus-bus tertentu. Dampak tersebut dapat menyebabkan penyempitan *Voltage Stability Margin* (VSM), pergeseran titik kritis sistem ke tingkat pembebanan yang lebih rendah, serta meningkatnya risiko terjadinya *voltage instability* dan *voltage collapse* [8]. Apabila kondisi ini terus berlanjut, kemampuan sistem dalam mempertahankan kontinuitas penyaluran daya listrik akan menurun dan berpotensi

memicu tindakan pengamanan sistem seperti pelepasan beban (*load shedding*) untuk mencegah gangguan yang lebih luas.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, diperlukan sumber daya reaktif tambahan yang mampu mendukung tegangan sistem secara efektif. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan *Static Var System* (SVS) karena mampu menghasilkan maupun menyerap daya reaktif secara dinamis sesuai kebutuhan sistem [9][10]. Kemampuan tersebut memungkinkan SVS memberikan dukungan tegangan yang lebih efektif, memperbaiki profil tegangan.

Untuk mengetahui sejauh mana penetrasi PLTS memengaruhi kestabilan tegangan serta mengevaluasi efektivitas pemasangan SVS dalam memperbaiki kondisi sistem, diperlukan metode analisis yang mampu menggambarkan karakteristik stabilitas tegangan secara kuantitatif. Salah satu metode yang umum digunakan adalah analisis kurva P-V dan kurva Q-V. Kurva P-V digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan tegangan terhadap peningkatan pembebanan hingga mencapai batas kritis, sedangkan kurva Q-V digunakan untuk mengevaluasi kecukupan daya reaktif dan menentukan margin daya reaktif pada suatu bus [11]. Melalui kedua metode tersebut, perubahan karakteristik stabilitas tegangan akibat penggantian generator sinkron oleh PLTS serta pengaruh pemasangan SVS terhadap perbaikan kondisi sistem dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

Dalam penelitian ini, analisis dilakukan pada sistem IEEE 39-Bus *New England Test System* yang merupakan salah satu sistem uji standar yang banyak digunakan dalam penelitian sistem tenaga listrik. Penetrasi PLTS dimodelkan melalui penggantian generator sinkron pada beberapa tingkat penetrasi untuk mengamati perubahan karakteristik stabilitas tegangan sistem. Selanjutnya, SVS dipasang pada bus yang terhubung dengan PLTS untuk mengevaluasi kemampuannya dalam memulihkan dukungan daya reaktif yang hilang akibat pelepasan generator sinkron. Kinerja sistem kemudian dievaluasi berdasarkan perubahan kurva P-V, kurva Q-V, serta nilai *Voltage Stability Margin* (VSM)[8].

Sebagai perbandingan, penelitian sebelumnya telah menggunakan metode kurva P-V dan Q-V untuk menganalisis margin stabilitas tegangan serta mengidentifikasi bus-bus lemah pada sistem tenaga listrik, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan prioritas perbaikan sistem. Namun, penelitian tersebut masih berfokus pada sistem konvensional dan belum mempertimbangkan perubahan karakteristik sistem akibat peningkatan penetrasi pembangkit berbasis inverter seperti PLTS. Penelitian lain telah menganalisis dampak penggantian generator sinkron oleh PLTS terhadap kestabilan tegangan serta melakukan perbaikan menggunakan kapasitor bank tetap. Akan tetapi, penggunaan kompensasi tetap memiliki keterbatasan dalam menyesuaikan kebutuhan daya reaktif yang berubah-ubah sesuai kondisi operasi sistem. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini terletak pada analisis pengaruh penetrasi PLTS terhadap stabilitas tegangan melalui penggantian generator konvensional secara

bertahap, serta evaluasi efektivitas pemasangan *Static Var System* (SVS) sebagai kompensasi daya reaktif dinamis untuk meningkatkan margin stabilitas tegangan sistem. Evaluasi dilakukan menggunakan kurva P–V, kurva Q–V, dan parameter *Voltage Stability Margin* (VSM).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana pengaruh variasi tingkat penetrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan sistem IEEE 39-bus?
2. Bus mana saja yang rentan terhadap gangguan stabilitas tegangan akibat peningkatan penetrasi PLTS?
3. Sejauh mana pemasangan SVS pada bus PLTS mampu memulihkan kestabilan tegangan akibat peningkatan penetrasi PLTS?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh variasi tingkat penetrasi PLTS terhadap kestabilan tegangan sistem IEEE 39-Bus
2. Mengidentifikasi bus-bus kritis yang rentan mengalami ketidakstabilan tegangan akibat peningkatan penetrasi PLTS
3. Menganalisis efektivitas pemasangan *Static Var System* (SVS) dalam memperbaiki kestabilan tegangan sistem yang mengalami penurunan akibat peningkatan penetrasi PLTS.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menjadi dasar pertimbangan dalam integrasi PLTS untuk mendukung target *net zero emission* tahun 2060 tanpa mengorbankan stabilitas tegangan sistem tenaga listrik.
2. Memberikan gambaran pengaruh penetrasi PV terhadap stabilitas tegangan sistem berdasarkan analisis kurva P–V, Q–V, dan *Voltage Stability Margin*.
3. Memberikan kajian mengenai efektivitas penggunaan *Static Var System* (SVS) sebagai kompensasi daya reaktif dinamis untuk meningkatkan stabilitas tegangan pada sistem dengan penetrasi PLTS

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan Batasan masalah sebagai berikut :

1. Analisis stabilitas tegangan difokuskan pada kondisi steady-state menggunakan kurva P–V dan Q–V, tanpa mempertimbangkan dinamika transien sistem.
2. Sistem yang digunakan adalah sistem IEEE 39-bus (*New England Test System*) dengan data standar.
3. Simulasi dan analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory.
4. PLTS diasumsikan beroperasi pada faktor daya satu (*unity power factor*), sehingga tidak memberikan dukungan daya reaktif kepada sistem.
5. Upaya perbaikan stabilitas tegangan dibatasi pada penggunaan *Static Var System* (SVS)
6. Penetrasi PLTS dimodelkan melalui penggantian generator sinkron yang ada pada sistem IEEE 39-Bus dengan pembangkit photovoltaic (PV) pada beberapa tingkat penetrasi yang ditentukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dari laporan penelitian ini sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka

Bab ini berisi tentang teori pendukung yang menjadi landasan tugas akhir ini.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini terdiri dari tahapan penelitian dan langkah-langkah yang diperlukan dalam penelitian.

Bab IV Hasil Dan Analisa

Bab ini menyajikan temuan penelitian yang diperoleh serta analisis mendalam terhadap data yang dikumpulkan, dengan mengacu pada teori yang telah dibahas dalam tinjauan Pustaka untuk memperkuat argument.

Bab V Penutup

Bab ini membahas tentang kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan.

Daftar Pustaka