

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Integrasi sistem tenaga listrik adalah proses penggabungan berbagai sumber energi untuk menciptakan jaringan yang efisien dan andal dalam penyediaan listrik. Konsep ini melibatkan penggunaan teknologi modern untuk menghubungkan pembangkit listrik dari sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya, angin, dan hidro, dengan jaringan distribusi atau transmisi yang ada. Integrasi kestabilan sistem tenaga listrik merujuk pada upaya untuk menjaga sistem kelistrikan tetap berfungsi secara stabil dan dapat mengatasi gangguan atau fluktuasi beban[1]. Secara umum, integrasi kestabilan sistem tenaga listrik dapat dibagi menjadi beberapa jenis, di antaranya stabilitas tegangan, stabilitas frekuensi, stabilitas dinamis, stabilitas kekuatan, stabilitas transien, dan stabilitas sistem terintegrasi. Stabilitas tegangan berkaitan dengan kemampuan sistem untuk menjaga tegangan tetap dalam batas yang dapat diterima meskipun terjadi gangguan pada sistem. Ketika terjadi peningkatan atau penurunan beban, sistem harus dapat mengatur tegangan untuk mencegah kerusakan atau penurunan kualitas daya. Stabilitas frekuensi berkaitan dengan kemampuan sistem untuk menjaga frekuensi tetap pada nilai nominal (biasanya 50 Hz atau 60 Hz) meskipun terjadi perubahan beban. Ketika beban sistem berubah, frekuensi bisa naik atau turun[2]. Sistem harus mampu mengembalikan keseimbangan antara daya yang dihasilkan dan daya yang dikonsumsi untuk menjaga frekuensi tetap stabil. Stabilitas dinamis ini merujuk pada kemampuan sistem untuk tetap stabil setelah adanya gangguan, seperti pemadaman pembangkit atau gangguan pada jaringan transmisi. Sistem harus dapat kembali ke kondisi operasi normal setelah terjadi gangguan tanpa mengalami kegagalan atau kerusakan. Stabilitas kekuatan ini mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghindari pergeseran sudut rotor generator yang dapat menyebabkan terputusnya koneksi antar unit pembangkit atau jaringan. Ketika terjadi gangguan, sudut rotor antara generator yang terhubung harus dapat disesuaikan untuk mencegah terjadinya kehilangan sinkronisasi. Stabilitas transien berkaitan dengan

kemampuan sistem untuk memulihkan operasi normal setelah gangguan besar, seperti pemadaman pembangkit atau sambungan yang terputus. Ini memerlukan analisis cepat untuk mencegah terjadinya kerusakan jangka panjang atau keruntuhan sistem[3]. Stabilitas sistem terintegrasi dalam konteks modern, ini juga mencakup integrasi berbagai sumber energi, seperti energi terbarukan (surya) dan energi konvensional (pembangkit berbahan bakar fosil) ke dalam grid tenaga listrik. Sistem yang lebih terintegrasi membutuhkan pendekatan baru untuk mengelola kestabilan, karena sumber energi terbarukan dapat menyebabkan fluktuasi yang lebih besar dalam daya yang dihasilkan[3].

Stabilitas sistem terintegrasi dalam konteks sistem tenaga listrik merujuk pada kemampuan sistem kelistrikan untuk beroperasi secara stabil meskipun ada integrasi berbagai jenis sumber daya pembangkit listrik yang berbeda, baik itu sumber daya konvensional (seperti pembangkit berbahan bakar fosil) maupun sumber energi terbarukan (seperti tenaga surya)[4].

Integrasi energi terbarukan ini membawa tantangan tersendiri dalam hal kestabilan sistem tenaga listrik. Beberapa poin penting dalam stabilitas sistem terintegrasi yaitu Keterbatasan sumber energi terbarukan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya sangat bergantung pada kondisi cuaca dan waktu. Misalnya, pembangkit tenaga surya hanya menghasilkan daya pada siang hari dan hanya ketika ada sinar matahari. Fluktuasi daya yang dihasilkan oleh sumber-sumber ini dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara pasokan dan permintaan daya, yang dapat memengaruhi frekuensi sistem[5].

Kestabilan frekuensi pada sistem tenaga listrik sangat penting karena frekuensi yang stabil adalah indikator utama dari keseimbangan antara daya yang dihasilkan dan daya yang dikonsumsi dalam sistem tersebut. Dalam sistem tenaga listrik yang ideal, daya yang dihasilkan oleh pembangkit harus sama dengan daya yang dikonsumsi oleh beban, dan frekuensi sistem (biasanya 50 Hz atau 60 Hz tergantung wilayah) harus tetap stabil. Kestabilan frekuensi adalah aspek krusial dalam operasional sistem tenaga listrik yang memastikan bahwa pasokan daya tetap seimbang dengan permintaan, serta menjaga integritas, efisiensi, dan keandalan sistem. Fluktuasi frekuensi yang besar dapat menyebabkan kerusakan peralatan, gangguan pada kualitas daya, dan potensi keruntuhan sistem. Pengelolaan kestabilan frekuensi sangat

penting, terutama ketika mengintegrasikan sumber daya terbarukan yang sering kali berfluktuasi dalam pembangkitan daya[5].

Perubahan nilai frekuensi merupakan akibat dari semakin tingginya kebutuhan beban, yang memberikan pengaruh yang semakin besar terhadap kestabilan frekuensi suatu sistem. Dimana suatu frekuensi sistem yang ditetapkan memiliki standar batas yaitu 4% dari frekuensi nominal yaitu $48H_z \leq u \leq 52H_z$ [5].

Sistem tenaga listrik memiliki standar batas frekuensi antara 48 Hz hingga 52 Hz, atau dengan kata lain memiliki toleransi sebesar $\pm 4\%$ dari frekuensi nominal 50 Hz, berasal dari ketentuan yang berlaku dalam standar operasional sistem kelistrikan, baik secara nasional maupun internasional. Secara nasional, batas ini tercantum dalam dokumen-dokumen teknis milik PT PLN (Persero), seperti Grid Code Indonesia dan panduan teknis interkoneksi pembangkit, yang dikeluarkan oleh Pusat Pengatur Beban (P2B). Dalam dokumen-dokumen tersebut, disebutkan bahwa frekuensi sistem listrik Indonesia harus dijaga dalam batas normal, biasanya 49,5 – 50,5 Hz, namun dalam kondisi darurat atau kontinjensi, toleransi maksimum yang masih dapat diterima adalah antara 48 Hz sampai 52 Hz. Sementara itu, secara internasional, batas $\pm 4\%$ ini juga diakui dalam beberapa standar seperti IEEE Std 1159 yang membahas kualitas daya listrik, serta IEC 60038 dari International Electrotechnical Commission yang menetapkan tegangan dan frekuensi nominal sistem kelistrikan. Di wilayah Eropa, misalnya, dalam aturan jaringan listrik ENTSO-E, batas frekuensi operasional mutlak juga ditetapkan antara 47,5 Hz hingga 52 Hz. Dengan demikian, batas frekuensi 48 Hz hingga 52 Hz merupakan standar yang diakui baik oleh PLN di tingkat nasional maupun oleh lembaga-lembaga internasional untuk menjaga kestabilan dan keandalan sistem tenaga listrik[6].

Bali menjadi lokasi penelitian dikarenakan pada daerah tersebut terdapat 4 PLTS yang masing-masing berkapasitas 25 MW yang mempengaruhi kestabilan frekuensi pada sistem transmisi.

Pemasangan PLTS dengan kapasitas 4 x 25 MW di Bali dilakukan sebagai bagian dari strategi transisi energi bersih yang mendukung target nasional dan daerah untuk meningkatkan bauran energi terbarukan, sekaligus mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang selama ini mendominasi pembangkitan listrik di pulau

tersebut. Bali sebagai daerah wisata internasional dengan citra alam yang bersih dan lestari memiliki kepentingan strategis untuk menjaga kelestarian lingkungan dan mengurangi emisi karbon, sehingga pemasangan PLTS dalam skala besar mendukung upaya menjaga keberlanjutan pariwisata dan kualitas lingkungan hidup. Selain itu, dengan tingginya potensi radiasi matahari di Bali yang relatif stabil sepanjang tahun, pembangkit listrik tenaga surya menjadi pilihan yang sangat sesuai secara teknis dan ekonomis. Kapasitas 4 x 25 MW dipilih karena memungkinkan adanya pembangkitan energi listrik dalam jumlah besar secara bertahap, fleksibel, dan terdistribusi, serta bisa mengurangi tekanan pada jaringan distribusi dan transmisi yang terbatas. Proyek ini juga sejalan dengan Peraturan Gubernur Bali No. 45 Tahun 2019 tentang Energi Bersih dan Peraturan Presiden No. 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan, yang mendorong pemanfaatan energi bersih untuk menciptakan sistem kelistrikan yang lebih andal, berkelanjutan, dan berdaulat secara energi di wilayah Bali[7].

Sistem kelistrikan di Bali saat ini didukung oleh kombinasi pembangkit listrik berbasis energi fosil dan energi terbarukan, yang membentuk suatu sistem jaringan kelistrikan interkoneksi untuk memenuhi kebutuhan listrik di seluruh pulau. Sebagian besar pembangkitan listrik di Bali masih didominasi oleh pembangkit berbahan bakar fosil, terutama dari PLTG Pesanggaran (Pembangkit Listrik Tenaga Gas) yang memiliki kapasitas sekitar 200 MW, dan PLTDG Gilimanuk yang juga berbahan bakar gas dan diesel dengan kapasitas kurang lebih 130 MW, yang secara keseluruhan menyumbang proporsi terbesar dalam pasokan energi listrik di sistem kelistrikan Bali. Selain itu, Bali juga memiliki interkoneksi dengan sistem Jawa-Bali melalui jaringan transmisi kabel laut (HVDC) yang membawa pasokan listrik tambahan dari Pulau Jawa, dengan kapasitas transfer sekitar 340 MW, yang membantu menjaga keandalan pasokan, terutama saat beban puncak[7].

Dari sisi energi terbarukan, Bali memiliki beberapa pembangkit skala kecil hingga menengah, seperti PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) skala kecil di area perkantoran atau fasilitas publik, dan beberapa PLTMH (Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro) yang tersebar di wilayah pegunungan, walaupun kontribusinya terhadap total kapasitas terpasang relatif kecil, yaitu hanya sekitar 2-3% dari total kapasitas

pembangkit di Bali. Pemerintah Provinsi Bali, melalui Peraturan Gubernur dan dukungan kebijakan nasional, mendorong peningkatan bauran energi terbarukan demi mewujudkan Bali sebagai daerah percontohan energi bersih.

Dengan ditambahkannya PLTS berkapasitas total 4 x 25 MW (100 MW) yang direncanakan atau sedang dalam proses konstruksi di beberapa titik strategis di Bali, maka kontribusi energi bersih akan mengalami peningkatan yang signifikan. Tambahan 100 MW dari pembangkit surya ini tidak hanya akan membantu menurunkan emisi karbon dan mengurangi konsumsi bahan bakar fosil, tetapi juga memperkuat kemandirian energi di Bali, khususnya saat permintaan listrik meningkat di musim pariwisata tinggi. Pemasangan PLTS ini juga sejalan dengan target nasional untuk mencapai bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025, serta mendukung visi Bali untuk menjadi provinsi yang berbasis energi bersih dan rendah emisi. Dengan integrasi pembangkit terbarukan yang lebih besar, sistem kelistrikan Bali diharapkan menjadi lebih tangguh, ramah lingkungan, dan berkelanjutan dalam jangka panjang[8].

Penelitian ini akan membahas tentang analisa pengaruh integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya terhadap kestabilan frekuensi sistem transmisi Bali menggunakan software DigSILENT PowerFactory. Untuk menganalisis kestabilan frekuensi akibat integrasi PLTS ke dalam sistem, maka simulasi dilakukan menggunakan studi kasus pada sistem kelistrikan Bali 150kV yang dilakukan dengan simulasi Load Flow dan RMS Simulation dengan metode perbandingan grafik respon frekuensi. Simulasi dalam penelitian ini bertujuan untuk menganalisa bagaimana kestabilan frekuensi pada sistem kelistrikan Bali sebelum dan sesudah diintegrasikan PLTS saat diberikan gangguan, penambahan beban dan pelepasan salah satu generator[8].

Dalam studi ini, dilakukan pemodelan sistem tenaga listrik tegangan tinggi 150 kV menggunakan perangkat lunak DigSILENT PowerFactory untuk menganalisis dampak integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terhadap kestabilan frekuensi sistem. Sistem terdiri dari beberapa bus, saluran transmisi tipe π , pembangkit konvensional bertipe synchronous generator yang dilengkapi governor dan AVR, serta beban statik yang tersebar di berbagai titik jaringan. PLTS dimodelkan sebagai pembangkit berbasis inverter grid-connected

yang dihubungkan ke jaringan melalui transformator step-up, dan dilengkapi kontrol daya aktif serta virtual inertia untuk mensimulasikan respons frekuensi.

Simulasi dilakukan dengan skenario gangguan. Parameter yang diamati mencakup frekuensi sistem, ROCOF, dan respons daya pembangkit. Hasil simulasi menunjukkan bahwa integrasi PLTS tanpa kontrol inersia menyebabkan penurunan frekuensi yang lebih tajam, sementara penggunaan virtual inertia pada inverter PLTS membantu memperlambat laju penurunan frekuensi dan mempercepat pemulihan sistem. Dengan demikian, pemodelan ini menunjukkan pentingnya pengaturan kontrol inverter dalam menjaga kestabilan frekuensi sistem tenaga listrik yang terintegrasi dengan energi terbarukan[9].

Penggunaan simulasi, agar dapat menganalisis pengaruh integrasi energi terbarukan terhadap sistem tenaga elektrik terutama pada kestabilan frekuensi sistem tenaga listrik. Simulasi ini memberikan keuntungan besar dalam memahami integrasi sistem yang kompleks, sehingga dapat mengetahui seberapa besar kestabilan frekuensi mempengaruhi sistem. Dalam simulasi kestabilan frekuensi, DigSILENT PowerFactory adalah software yang sangat tepat. Software ini mendukung berbagai analisis kestabilan, termasuk stabilitas tegangan, stabilitas frekuensi, dan stabilitas dinamis, yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik yang mengintegrasikan energi terbarukan. Dengan banyaknya variabel yang terlibat (seperti fluktuasi daya dari pembangkit tenaga surya), DigSILENT PowerFactory dapat menganalisis respons sistem terhadap gangguan dan perubahan yang terjadi, serta bagaimana sistem kembali ke keadaan stabil. DigSILENT PowerFactory juga dapat digunakan untuk memodelkan dinamika frekuensi, yang menjadi perhatian utama dalam integrasi sumber daya terbarukan yang tidak stabil seperti tenaga surya, karena kemampuannya untuk melakukan simulasi berbagai skenario, termasuk dinamika fluktuasi daya yang berasal dari pembangkit terbarukan. Kemampuan untuk melakukan analisis stabilitas, transien, dan proteksi dalam konteks integrasi energi terbarukan menjadikan DigSILENT PowerFactory sebagai alat yang kuat dalam merancang, mengoperasikan, dan memelihara sistem tenaga listrik yang modern dan berkelanjutan.

1.2 Rumusan Masalah

Dari paparan latar belakang diatas maka dapat disimpulkan beberapa masalah yang akan dituangkan dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana jaringan transmisi Bali jika terjadi Integrasi PLTS memiliki standar batas frekuensi sistem yaitu 4% dari frekuensi nominal yaitu $48H_z \leq u \leq 52H_z$ terhadap kestabilan frekuensi sistem tenaga listrik?
2. Bagaimana pengaruh integrasi pembangkit energi terbarukan PLTS terhadap kestabilan frekuensi sistem tenaga listrik jaringan transmisi Bali jika terjadi penambahan beban?
3. Bagaimana pengaruh integrasi pembangkit energi terbarukan PLTS terhadap kestabilan frekuensi sistem tenaga listrik jaringan transmisi Bali jika terjadi pelepasan salah satu generator?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis dampak integrasi pembangkit energi terbarukan PLTS terhadap kestabilan sistem tenaga listrik, dengan hasil simulasi yang menunjukkan standar batas frekuensi sebesar 4% dari frekuensi nominal yaitu $48H_z \leq u \leq 52H_z$ menggunakan model simulasi DigSilent Powerfactory 15.1 yang dapat digunakan
2. Mengidentifikasi dan menganalisa pengaruh integrasi sumber energi terbarukan PLTS kapasitas 4x25 MW jika terjadi penambahan beban pada sistem jaringan transmisi Bali, mempengaruhi kestabilan operasional sistem tenaga listrik dengan kapasitas 150 kV, dengan memastikan bahwa standar batas frekuensi sebesar 4% dari frekuensi nominal yaitu $48H_z \leq u \leq 52H_z$
3. Mengidentifikasi dan menganalisa pengaruh integrasi sumber energi terbarukan PLTS kapasitas 4x25 MW jika terjadi pelepasan salah satu generator pada sistem jaringan transmisi Bali, mempengaruhi kestabilan operasional sistem tenaga listrik

dengan kapasitas 150 kV, dengan memastikan bahwa standar batas frekuensi sebesar 4% dari frekuensi nominal yaitu $48H_z \leq u \leq 52H_z$

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini penting untuk meningkatkan keandalan sistem, mengoptimalkan pemanfaatan PLTS, mendukung transisi energi bersih, menyempurnakan regulasi, dan meningkatkan kompetensi SDM di bidang energi terbarukan, dengan fokus menjaga kestabilan frekuensi sistem tenaga listrik dalam batasan yang ditetapkan.

1.5 Batasan Masalah

Dari rumusan masalah dan tujuan yang ingin dicapai diatas, maka penulis akan memberikan batasan masalah agar pembahas tidak melebar dan tetap pada fokus utama penelitian, yaitu sebagai berikut:

1. Jenis Sumber Energi Terbarukan:

Penelitian ini hanya akan membahas pembangkit energi terbarukan dari sumber tenaga surya kapasitas 4x25 MW pada sistem transmisi Bali 150 kV.

2. Skala Sistem:

Analisis akan difokuskan pada sistem tenaga listrik yang terintegrasi dengan jaringan listrik nasional. Sistem kecil atau off-grid tidak termasuk dalam cakupan penelitian ini.

3. Aspek Kestabilan yang Diperhatikan:

Penelitian ini akan memfokuskan pada analisis kestabilan dinamis dan transien dari sistem tenaga listrik setelah penambahan pembangkit energi terbarukan. Kestabilan steady state juga akan dianalisis, tetapi tidak secara mendalam.

4. Software yang digunakan dalam simulasi

Sistem tersebut adalah DigSilent Powerfactory versi 15.1

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan laporan skripsi ini disusun secara sistematis agar mempermudah dalam memahami pembahasan laporan skripsi ini, dengan susunan sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan dasar pemikiran dan arah penelitian yang dilakukan.

Latar Belakang: Menguraikan pentingnya integrasi PLTS 4×25 MW ke dalam sistem tenaga listrik Bali 150 kV, serta dampaknya terhadap kestabilan frekuensi sistem.

Rumusan Masalah: Merumuskan permasalahan utama, yaitu bagaimana pengaruh dan pemodelan integrasi PLTS terhadap kestabilan frekuensi sistem saat terjadi gangguan, penambahan beban, dan pelepasan pembangkit.

Tujuan Penelitian: Menjelaskan tujuan analisis kestabilan frekuensi akibat integrasi PLTS menggunakan simulasi DigSILENT PowerFactory.

Manfaat Penelitian: Menyebutkan manfaat dari sisi teknis, pengembangan energi terbarukan, dan peningkatan pengetahuan.

Batasan Masalah: Membatasi ruang lingkup penelitian hanya pada PLTS kapasitas 100 MW, sistem 150 kV Bali, kestabilan frekuensi, dan simulasi dengan DigSILENT.

Sistematika Penulisan: Menjelaskan struktur skripsi dari Bab I hingga Bab V agar memudahkan pembaca memahami isi laporan.

BAB II : LANDASAN TEORI

Menyajikan teori-teori dasar yang relevan dan mendukung topik penelitian. Pembahasan mencakup konsep Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), kestabilan sistem tenaga listrik, frekuensi sistem, serta perangkat lunak simulasi seperti DigSILENT PowerFactory 15.1 yang digunakan dalam penelitian.

BAB III: METODE PENELITIAN

Menjelaskan langkah-langkah penelitian yang dilakukan, mulai dari pengumpulan data, desain sistem kelistrikan, hingga tahapan simulasi dan analisis kestabilan frekuensi. Disertai juga flowchart alur penelitian serta gambaran umum sistem transmisi 150 kV Bali.

BAB IV : ANALISIS HASIL

Berisi hasil simulasi yang dilakukan menggunakan software DigSILENT PowerFactory 15.1. Pembahasan mencakup pengaruh integrasi PLTS terhadap kestabilan frekuensi sistem, baik pada kondisi normal maupun saat terjadi gangguan seperti penambahan beban dan pelepasan generator.

BAB V : PENUTUP

Berisi kesimpulan dari hasil analisis dan saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian selanjutnya atau aplikasi di dunia nyata dalam pengelolaan sistem tenaga listrik dengan integrasi energi terbarukan.