

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir integrasi pembangkit listrik, khususnya pembangkit *Photovoltaic* (PV), terus meningkat seiring transisi global menuju energi terbarukan. Pembangkit PV memiliki karakteristik intermiten dan non-inersial yang berbeda dari pembangkit konvensional, sehingga berpotensi mengurangi kestabilan sistem tenaga listrik, terutama dalam hal kestabilan frekuensi saat terjadi gangguan sistem [1]. Situasi ini menuntut adanya strategi proteksi frekuensi yang mampu merespons penurunan frekuensi secara cepat dan efektif.

Salah satu perangkat proteksi utama yang digunakan adalah *Under Frequency Relay* (UFR). UFR berfungsi untuk mendeteksi penurunan frekuensi sistem dan secara otomatis melakukan pelepasan beban (*load shedding*) demi menyeimbangkan kembali daya dan mencegah keruntuhan sistem. Namun demikian, efektivitas UFR sangat dipengaruhi oleh pengaturan parameter seperti ambang frekuensi (*set Point*) dan waktu tunda (*time delay*). *Setting* yang kurang optimal dapat menyebabkan keterlambatan dalam *load shedding* atau pelepasan beban yang berlebihan [2].

Integrasi pembangkit listrik tenaga surya *Photovoltaic* (PV) ke dalam sistem tenaga listrik memunculkan tantangan dalam menjaga kestabilan frekuensi, sebab PV tidak memiliki inersia seperti pembangkit konvensional [3]. Oleh karena itu, pengaturan *setting* UFR harus dianalisis secara menyeluruh untuk menentukan konfigurasi yang paling efektif dalam menjaga stabilitas frekuensi. Parameter yang dianalisis meliputi nilai batas frekuensi aktivasi UFR, waktu tunda operasi, dan skenario pelepasan beban bertingkat sesuai penurunan frekuensi [4].

Frekuensi adalah salah satu bagian penting dalam sistem tenaga listrik karena sangat erat kaitannya dengan kualitas sumber energi. Relai *under frequency* mendeteksi sistem frekuensi dari fasa ke netral untuk meningkatkan sistem proteksi. Relai ini melindungi jaringan listrik dan semua komponen yang memiliki inti

magnetik, misalnya, transformator, motor, dan generator dengan frekuensi terbatas [5].

Penelitian ini secara khusus akan menganalisis bagaimana variasi pengaturan *Under Frequency Relay* (UFR) memengaruhi respon sistem terhadap gangguan frekuensi, terutama melalui mekanisme *load shedding*. Parameter *setting* UFR seperti ambang batas frekuensi (misalnya 59.9 Hz, 59.8 dan 58.5 Hz). *Setting* yang terlalu agresif dapat menyebabkan pelepasan beban yang tidak proporsional, sementara *setting* yang terlalu longgar bisa memperlambat respon sistem hingga menyebabkan ketidakseimbangan daya semakin parah [6].

Meskipun fokus utama adalah pada strategi proteksi frekuensi melalui *setting* UFR dan skema *load shedding*, penting pula untuk mempertimbangkan konteks integrasi pembangkit tersebar, khususnya PV, ke dalam sistem tenaga. Pembangkit PV yang tidak menyumbang inersia menyebabkan penurunan kemampuan sistem dalam menahan perubahan frekuensi mendadak. Hal ini menjadikan sistem lebih sensitif terhadap gangguan, sehingga pengaturan UFR menjadi semakin krusial dalam skenario pelepasan pembangkit PV dari jaringan [7].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini mengangkat judul **"Analisis Pengaruh *Setting* UFR dengan Skema *Load Shedding* terhadap Stabilitas Frekuensi Sistem *Grid* Terintegrasi *Photovoltaic*"**. Studi ini bertujuan untuk menganalisis bagaimana variasi pengaturan UFR, khususnya pada parameter ambang frekuensi dan *load shedding*, memengaruhi *respons* sistem tenaga listrik terhadap gangguan penurunan frekuensi. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengeneratorai efektivitas *setting* UFR dalam menjaga kestabilan frekuensi, terutama dalam kondisi sistem yang telah terintegrasi dengan *Photovoltaic* (PV).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, dapat dirumuskan permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini.

1. Bagaimana pengaruh variasi *setting* (UFR) *Under Frequency Relay* terhadap stabilitas frekuensi pada Sistem *Grid* Terintegrasi *Photovoltaic* dengan pelepasan pembangkit dan *load shedding*?
2. Bagaimana pengaruh integrasi *Photovoltaic* (PV) terhadap stabilitas frekuensi sistem *Grid*, baik secara mandiri maupun dalam kombinasi dengan UFR, dalam proses pemulihan sistem pasca pelepasan pembangkit dan *load shedding*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi *setting* UFR terhadap *respons* sistem tenaga listrik dalam menstabilkan frekuensi dengan pelepasan pembangkit.
2. Mengevaluasi kontribusi *Photovoltaic* (PV) terhadap pemulihan frekuensi sistem, baik secara mandiri maupun saat diintegrasikan dengan skema *load shedding*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan referensi teknis terkait pengaturan UFR yang efektif dalam menjaga kestabilan frekuensi sistem saat terjadi gangguan besar, serta mengidentifikasi tantangan integrasi *Photovoltaic* dalam sistem proteksi frekuensi.
2. Memberikan wawasan baru mengenai pentingnya koordinasi antara proteksi frekuensi (UFR), skema *load shedding*, dan *Photovoltaic* (PV) untuk meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik modern.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan dengan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibatasi pada sistem tenaga listrik menggunakan model sistem transmisi IEEE 14 bus yang dimodifikasi dan dimodelkan menggunakan perangkat lunak DIGSILENT *PowerFactory* Fokus pada pelepasan pembangkit sebagai skenario terburuk pada sistem tenaga Listrik.
2. Simulasi difokuskan pada skenario pelepasan dua pembangkit (Generator 0008 dan generator 0003) secara tiba-tiba (*out of service*) untuk mengamati penurunan frekuensi dan kinerja sistem proteksi frekuensi

3. Pelepasan beban (*load shedding*) dipilih di titik *load* 0003, 0004 dan *load* 0009.
4. Analisis UFR pada penelitian ini dibatasi pada variasi ambang frekuensi aktivasi dan besaran *load shedding*, tanpa membahas proteksi lain, agar fokus pada studi *respons* sistem terhadap skenario kehilangan pembangkit.
5. Software yang digunakan pada penelitian ini adalah DIgSILENT *PowerFactory* 15.1.
6. Optimasi terbatas pada *threshold* frekuensi basis 60 Hz dan *time delay* (0,1 detik), tanpa modifikasi *hardware* UFR.
7. Penelitian ini menetapkan batas bawah frekuensi sebesar 58,2 Hz (97% dari nominal) sebagai acuan untuk mengaktivasi proteksi UFR.
8. Penambahan PV dimodelkan sebagai sumber daya tetap (*fixed power*) sebesar 60 MW, tanpa simulasi dinamika MPPT atau fluktuasi irradiansi, untuk menyederhanakan analisis stabilitas frekuensi.
9. Skema *load shedding* dibatasi pada metode berbasis frekuensi (*frequency-based load shedding*) yang dibagi menjadi beberapa Tingkat *present load shedding* sebesar dari 10%, 20%, 30% dan 40% berdasarkan *step* pelepasan beban.
10. Pembangkit PV dimodelkan berkapasitas tetap 60 MW tanpa sistem penyimpanan energi dan tanpa kontribusi inersia, demi menyederhanakan analisis fokus pada pengaruh *setting* UFR dan *load shedding*.
11. Penelitian hanya menganalisis kondisi siang hari saat PV beroperasi, tanpa mempertimbangkan ketersediaan daya PV pada malam hari.

1.6 Sistematika Penulisan

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 membahas tentang teori pendukung yang melandasi tugas akhir ini.

Bab III Metodologi Penelitian

Bab ini terdiri dari tahapan penelitian dan langkah-langkah yang diperlukan dalam melakukan rekonfigurasi sistem proteksi.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas tentang hasil perhitungan *setting* relai arus lebih dan relai arus lebih berarah dan analisa koordinasi relai proteksi ketika diberi gangguan hubung singkat.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari penulis setelah melakukan penelitian tugas akhir.

