

SKRIPSI

**STUDI PELEPASAN BEBAN MENGGUNAKAN *UNDER
FREQUENCY RELAY* PADA SISTEM KELISTRIKAN
SULBAGSEL AKIBAT GANGGUAN PLTA YANG
DISEBABKAN OLEH FENOMENA EL NINO**

Disusun dan diajukan oleh:

MULIATI IDRIS

D041 20 1079



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

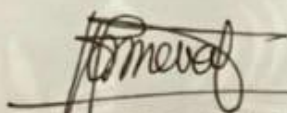
STUDI PELEPASAN BEBAN MENGGUNAKAN *UNDER FREQUENCY RELAY* PADA SISTEM KELISTRIKAN SULBAGSEL AKIBAT GANGGUAN PLTA YANG DISEBABKAN OLEH FENOMENA EL NINO

Disusun dan diajukan oleh

Muliati Idris
D041201079

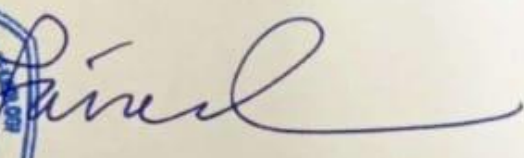
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 16 Oktober 2024
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing Utama,



Dr. Ir. Zaenab Muslimin, M.T.
NIP. 196602011992022002

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Ir. H. A. Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
NIP. 197506052002121004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muliati Idris

NIM : D041201079

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**STUDI PELEPASAN BEBAN MENGGUNAKAN *UNDER FREQUENCY*
RELAY PADA SISTEM KELISTRIKAN SULBAGSEL AKIBAT
GANGGUAN PLTA YANG DISEBABKAN OLEH FENOMENA EL NINO**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 16 Oktober 2024

Yang Menyatakan



10000
METEORIT
TEMPAT
04041AMX012963328

Muliati Idris

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat Rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Studi Pelepasan Beban Menggunakan *Under Frequency Relay* Pada Sistem Kelistrikan Sulbagsel Akibat Gangguan PLTA yang Disebabkan Oleh Fenomena El Nino”**. Shalawat serta salam semoga senantiasa tercurahkan kepada junjungan baginda Nabi Muhammad Shallallahu 'alaihi wa sallam, pembawa risalah agung yang dengan penuh kasih sayang menuntun umat manusia dari gelapnya kebodohan menuju cahaya petunjuk Ilahi, membuka hati yang tertutup dan menuntun jiwa-jiwa menuju kebenaran yang hakiki dalam naungan ajaran Islam.

Skripsi ini adalah puncak dari perjalanan panjang penuh lika-liku, yang diwarnai dengan kegembiraan, kekecewaan, harapan, dan kerja keras tanpa henti. Setiap halaman skripsi ini adalah saksi bisu buah dari perjuangan panjang yang penuh tantangan tiada henti dan doa-doa yang terpanjatkan disetiap sujud. Perjalanan ini telah ditempuh dengan segala pengorbanan, rasa lelah yang berulang kali, serta semangat yang terkadang hampir padam, namun kembali menyala oleh keyakinan akan harapan dan cita-cita. Skripsi ini bukan hanya sebuah karya akademik, tetapi juga kisah perjuangan hati dan tekad, yang disusun dengan penuh kesungguhan sebagai salah satu syarat untuk meraih gelar Sarjana di Program Studi Teknik Elektro, Universitas Hasanuddin. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis telah menerima banyak bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segenap rasa hormat, penulis ingin menyampaikan terima kasih yang tak terhingga kepada:

1. Ibunda tercinta Darmawati dan Ayahanda Idris yang tiada pernah lelah memanjatkan doa-doa di setiap malam sunyi, mencurahkan kasih sayang tanpa batas, serta memberi dukungan, baik secara moral maupun materi, dengan tulus dan penuh cinta. Segala pengorbanan kalian adalah cahaya penerang dalam setiap langkah penulis. Juga kepada saudara-saudari penulis Riswandi Idris, Ardiansyah Idris, Ida Adriani Idris dan Asriyanti

Idris yang senantiasa memberi semangat, doa, dan sebagai tempat penulis berkeluh kesah selama proses pengerjaan skripsi ini.

2. Ketua Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin, Bapak Prof. Dr.-Ing. Ir. Faizal A Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
3. Ibu Dr. Ir. Zaenab Muslimin, M.T., selaku dosen pembimbing yang dengan penuh kesabaran dan ketulusan hati telah meluangkan waktu di tengah kesibukannya, memberikan bimbingan, saran serta kritik yang sangat membangun selama penulisan skripsi ini.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Indar Chaerah Gunadin, S.T., M.T., IPM dan Ibu Ir. Hasniaty, S.T., M.T., Ph.D., selaku dosen penguji yang telah memberikan masukan serta kritik dan saran guna penyempurnaan skripsi ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro atas segala ilmu, bantuan dan kemudahan yang diberikan selama penulis menempuh proses perkuliahan.
6. Saudari Jasmarani sobat seperjuangan
7. Saudari Jasmarani, Srikandy Anugrah, Isti, Faizah Nurul Inayah, dan Mutmainnah Tulhadawiah yang telah menjadi tempat berbagi cerita dan tempat penulis menghilangkan kerumitan selama menghadapi dunia perkuliahan yang senantiasa memberikan semangat tanpa henti.
8. Teman-Teman seperjuangan Laboratorium Riset Relay Proteksi dan Pengukuran Jasmarani, Putri Amelia, Ghirah Arrahman, Muhammad Rezki, Muhammad Ridha, Khoiraldis Ghiandifath, Yusril Razak, Ahmad Abidillah, Alif Shadiq, dan Yogi Satrya. Terima kasih atas kebersamaan, kerjasama, saran dan dukungan kepada penulis selama proses penyusunan skripsi.
9. Keluarga PROCEZ20R, yang telah memberikan warna dan cerita panjang dalam dunia perkuliahan penulis. Kebersamaan dalam suka dan duka, tawa dan air mata, serta kerja keras yang saling memotivasi, telah

menciptakan kenangan tak terlupakan. Kalian adalah bagian penting dalam perjalanan ini, dan penulis merasa beruntung menjadi bagian dalam keluarga besar ini dan dapat berbagi momen berharga dengan kalian semua. Terima kasih atas semangat dan persahabatan yang telah dibangun bersama.

10. Kepada kanda CAL18RATOR dan TR19GER yang telah memberikan masukan dan saran serta mengajari penulis dalam proses penelitian yang tidak penulis ketahui.
11. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu dan mendukung dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam skripsi ini, oleh karena itu saran dan kritik dari semua pihak diharapkan untuk kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat diterima sebagai sumbangan pikiran penulis yang mendatangkan manfaat baik bagi penulis maupun pembacanya.

Gowa, 16 Oktober 2024

Penulis

ABSTRAK

MULIATI IDRIS. *Studi Pelepasan Beban Menggunakan Under Frequency Relay Pada Sistem Kelistrikan Sulbagsel Akibat Gangguan PLTA Yang Disebabkan Oleh Fenomena El Nino* (dibimbing oleh Zaenab Muslimin)

Fenomena El Nino yang terjadi pada akhir tahun 2023 memberikan dampak signifikan terhadap sektor energi di Sulawesi bagian Selatan, terutama dengan penurunan kapasitas pembangkit listrik pada PLTA akibat kemarau panjang yang mengurangi kemampuan produksi hingga sekitar 75%. Penurunan kapasitas ini memicu defisit energi yang serius di wilayah Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat, Sulawesi Tengah, dan Sulawesi Tenggara, serta mengganggu stabilitas frekuensi dalam sistem kelistrikan. Untuk memulihkan frekuensi sistem yang menurun secara signifikan, diperlukan skema darurat seperti load shedding. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak load shedding menggunakan *Under Frequency Relay* (UFR) pada stabilisasi frekuensi sistem dalam berbagai skenario. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan kapasitas pembangkitan sebesar 25% menyebabkan frekuensi turun hingga 49.666 Hz sebelum stabil pada 49.813 Hz, sementara penurunan kapasitas sebesar 50% menurunkan frekuensi hingga 49.421 Hz, dan penurunan kapasitas 75% menyebabkan penurunan frekuensi yang lebih drastis hingga 27.790 Hz. Penurunan kapasitas secara penuh (100%) bahkan menghasilkan penurunan frekuensi yang signifikan hingga mencapai 16.638 Hz, menunjukkan bahwa semakin besar penurunan kapasitas pembangkitan, semakin besar pula penurunan frekuensi yang terjadi, yang mengancam stabilitas operasional sistem kelistrikan Sulbagsel. Setelah penerapan skema load shedding, frekuensi sistem menunjukkan peningkatan signifikan, dengan skema tiga tahap berhasil meningkatkan frekuensi dalam rentang 49.501 Hz hingga 50 Hz, sedangkan skema enam tahap meningkatkan frekuensi hingga 49.613 Hz hingga 50 Hz. Kedua skema ini berhasil mengembalikan frekuensi sistem ke batas normal sesuai dengan standar ANSI/IEEE C37.106-1987, menegaskan pentingnya peran UFR dalam menjaga stabilitas sistem kelistrikan, terutama dalam kondisi darurat yang memerlukan tindakan segera.

Kata kunci : frekuensi, load shedding, *Under Frequency Relay* (UFR)

ABSTRACT

MULIATI IDRIS. *Study of Load Shedding Using Under Frequency Relay in the Sulbagsel Power System Due to Hydropower Plant Disruptions Caused by the El Nino Phenomenon (supervised by Zaenab Muslimin)*

The El Nino phenomenon at the end of 2023 had a significant impact on the energy sector in South Sulawesi, particularly with the reduction of power generation capacity at hydropower plants due to prolonged drought, which decreased production capacity by approximately 75%. This capacity reduction triggered a serious energy deficit in the regions of South Sulawesi, West Sulawesi, Central Sulawesi, and Southeast Sulawesi, and disrupted frequency stability in the power system. To restore the significantly decreased system frequency, emergency measures such as load shedding are required. This study aims to analyze the impact of load shedding using Under Frequency Relay (UFR) on frequency stabilization in various scenarios. The study's findings indicate that a 25% reduction in power generation capacity caused the frequency to drop to 49.666 Hz before stabilizing at 49.813 Hz, while a 50% reduction lowered the frequency to 49.421 Hz, and a 75% reduction caused a more drastic frequency drop to 27.790 Hz. A full (100%) reduction in capacity resulted in a significant frequency drop to 16.638 Hz, indicating that the greater the reduction in generation capacity, the greater the frequency drop, threatening the operational stability of the Sulbagsel power system. After implementing the load shedding scheme, the system frequency showed a significant increase, with the three-stage scheme raising the frequency to the range of 49.501 Hz to 50 Hz, while the six-stage scheme increased it to the range of 49.613 Hz to 50 Hz. Both schemes successfully restored the system frequency to the normal range according to the ANSI/IEEE C37.106-1987 standard, emphasizing the importance of UFR in maintaining the stability of the power system, especially in emergency situations requiring immediate action.

Keywords: *frequency, load shedding, Under Frequency Relay (UFR)*

DAFTAR ISI

SKRIPSI.....	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	6
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)	8
2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik	9
2.3.1 Kestabilan Keadaan Tetap.....	10
2.3.2 Kestabilan Dinamis (<i>Dynamic Stability</i>).....	11
2.3.3 Kestabilan Peralihan (<i>Transient stability</i>).....	11
2.4 Stabilitas Frekuensi (<i>Frequency Stability</i>)	12
2.5 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif.....	12
2.6 Penurunan Frekuensi Akibat Gangguan Unit Pembangkit	14
2.7 <i>Under Frequency Relay</i>	17
2.7.1 Prinsip Kerja <i>Under Frequency Relay</i>	18
2.8 Pelepasan Beban.....	20
2.8.1 Pelepasan Beban Akibat Penurunan Frekuensi	22
2.8.2 Jenis Pelepasan Beban	23
2.9 Indeks Kekuatan Sistem (IKS) Sulbagsel	24
2.10 <i>Software DigSilent (Digital Simulation of Electrical Network)</i>	25
2.11 Penelitian Terdahulu yang Terkait	25
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	28
3.2 Alat dan Bahan	28
3.3 Teknik Pengumpulan Data	28
3.4 Teknik Pengolahan Data	28
3.5 Teknik Analisa Data.....	29
3.6 Alur Penelitian.....	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	31
4.1 <i>Single Line Diagram</i> Sistem Sulawesi Bagian Selatan.....	31
4.2 Indeks Kekuatan Sistem (IKS).....	33
4.3 Pelaksanaan Simulasi	34

4.4 Hasil dan Pembahasan.....	36
4.4.1 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel dalam Kondisi Normal.....	36
4.4.2 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Kapasitas PLTA Turun 25%	37
4.4.3 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Kapasitas PLTA Turun 50%	38
4.4.4 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Kapasitas PLTA Turun 75%	40
4.4.5 Simulasi Frekuensi Sistem Sulbagsel Skenario Kapasitas PLTA Turun 100%	41
4.5 Skema Pelepasan Beban.....	42
4.5.1 Skema Pelepasan Beban dengan 3 Tahap	43
4.5.2 Skema Pelepasan Beban dengan 6 Tahap	48
4.6 Simulasi Setelah Pelepasan Beban.....	59
4.6.1 Skema Pelepasan Beban 3 Tahap	59
4.6.2 Skema Pelepasan Beban 6 Tahap	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	67
DAFTAR PUSTAKA	69
LAMPIRAN	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Skema sistem tenaga listrik	7
Gambar 2 Proses Konversi energi pada PLTA	8
Gambar 3 Diagram pengawatan <i>under frequency relay</i>	18
Gambar 4 Kurva karakteristik <i>under frequency relay</i>	19
Gambar 5 Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban	21
Gambar 6 Diagram alur penelitian	30
Gambar 7 <i>Single line diagram</i> sistem kelistrikan Sulawesi Bagian Selatan.....	32
Gambar 8 Indeks kekuatan sistem Sulbagsel	34
Gambar 9 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel dalam kondisi normal	36
Gambar 10 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 25%	37
Gambar 11 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 50%	38
Gambar 12 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 75%	40
Gambar 13 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 100%	41
Gambar 14 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 50% dengan skema pelepasan beban 3 tahap.....	59
Gambar 15 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 75% dengan skema pelepasan beban 3 tahap.....	61
Gambar 16 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 100% dengan skema pelepasan beban 3 tahap.....	62
Gambar 17 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 50% dengan skema pelepasan beban 6 tahap.....	63
Gambar 18 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 75% dengan skema pelepasan beban 6 tahap.....	64
Gambar 19 Simulasi frekuensi sistem Sulbagsel skenario kapasitas PLTA turun 100% dengan skema pelepasan beban 6 tahap.....	65

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Standar Load Shedding 3 Tahap	22
Tabel 2 Standar Load Shedding 6 Tahap	23
Tabel 3 Simulasi Skenario Pelepasan Pembangkit	33
Tabel 4 Pelepasan Beban Tahap 1 pada Skema Pelepasan Beban dengan 3 Tahap	44
Tabel 5 Pelepasan Beban Tahap 2 pada Skema Pelepasan Beban dengan 3 Tahap	45
Tabel 6 Pelepasan Beban Tahap 3 pada Skema Pelepasan Beban dengan 3 Tahap	47
Tabel 7 Pelepasan Beban Tahap 1 pada Skema Pelepasan Beban dengan 6 Tahap	49
Tabel 8 Pelepasan Beban Tahap 2 pada Skema Pelepasan Beban dengan 6 Tahap	51
Tabel 9 Pelepasan Beban Tahap 3 pada Skema Pelepasan Beban dengan 6 Tahap	53
Tabel 10 Pelepasan Beban Tahap 4 pada Skema Pelepasan Beban dengan 6 Tahap	54
Tabel 11 Pelepasan Beban Tahap 5 pada Skema Pelepasan Beban dengan 6 Tahap	55
Tabel 12 Pelepasan Beban Tahap 6 pada Skema Pelepasan Beban dengan 6 Tahap	57

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

El Niño adalah pola iklim yang menggambarkan pemanasan yang tidak biasa pada permukaan air di Pasifik tropis bagian timur. El Niño adalah "fase hangat" dari fenomena yang lebih besar yang disebut *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO). Fenomena *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) adalah anomali suhu permukaan laut di Samudera Pasifik, di mana suhu di pantai barat Ekuador dan Peru lebih tinggi dari rata-rata normalnya, sementara suhu di wilayah Pasifik bagian barat dan perairan Indonesia yang biasanya hangat (*warm pool*) menjadi lebih dingin. Ketika El Nino terjadi, daerah pertumbuhan awan bergeser dari wilayah Indonesia ke Samudra Pasifik bagian tengah, mempengaruhi pola iklim dan menyebabkan berkurangnya curah hujan di Indonesia, sehingga mengakibatkan musim kemarau panjang dan kekeringan ekstrem di beberapa wilayah (BMKG, 2023).

El Nino sebagai fenomena iklim global berdampak terhadap perubahan pada pola curah hujan, terutama di wilayah Asia Tenggara, termasuk Indonesia. Fenomena ini menyebabkan kemarau lebih panjang dan intens dibandingkan dengan kondisi normal. Dalam situasi ini, wilayah yang biasanya mengalami musim hujan secara teratur dapat mengalami penurunan curah hujan yang drastis atau bahkan tidak menerima hujan sama sekali selama berbulan-bulan. Kekeringan yang berkepanjangan ini mempengaruhi pasokan air sehingga terjadi penurunan debit aliran sungai.

Fenomena El Nino yang terjadi pada akhir tahun 2023, telah memberikan dampak yang signifikan terhadap sektor energi di Sulawesi bagian Selatan. Salah satu dampak yang paling mencolok adalah penurunan kapasitas pembangkit listrik pada PLTA. General Manager PLN Unit Induk Distribusi Sulserabar, Moch Andy Adchaminoerdin mengatakan pada kondisi normal daya mampu pasok (DMP) sistem kelistrikan Sulbagsel mencapai 2.300 MW, dengan kontribusi PLTA sebesar 850 MW. Namun, akibat kemarau berkepanjangan, kemampuan produksi PLTA di Sulbagsel turun drastis sebesar 75%. Penurunan kapasitas pembangkit

ini menyebabkan defisit energi yang serius di wilayah Sulawesi Selatan, Sulawesi Barat, Sulawesi Tengah, dan Sulawesi Tenggara (Sulselprov.go.id, 2023).

PLTA merupakan salah satu pembangkit yang sangat bergantung pada ketersediaan air dari sungai. Ketika debit aliran sungai menurun, kemampuan produksi listrik di PLTA pun juga turun. Debit air yang mengalir melalui sungai menuju waduk merupakan bahan bakar utama bagi proses pembangkitan listrik. Turbin di PLTA berfungsi untuk mengubah energi kinetik dari air yang bergerak menjadi energi mekanik kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator. Ketika debit aliran air sungai menurun, jumlah air yang tersedia untuk menggerakkan turbin juga berkurang sehingga laju putaran turbin menurun menyebabkan penurunan produksi listrik.

Penurunan kapasitas pembangkit listrik pada PLTA memiliki dampak terhadap stabilitas frekuensi dalam sistem kelistrikan. Dalam sistem tenaga, keseimbangan antara pembangkitan dan beban sangat penting untuk menjaga frekuensi sistem pada nilai nominal, yaitu 50 Hz. Ketika kapasitas pembangkitan berkurang, pasokan listrik ke jaringan juga akan berkurang. Jika permintaan beban tetap konstan atau bahkan meningkat, maka akan terjadi ketidakseimbangan antara pembangkitan dan beban. Ketidak seimbangan ini menyebabkan penurunan frekuensi sistem.

Frekuensi merupakan indikator dari keseimbangan daya dalam jaringan. Jika daya yang dihasilkan oleh pembangkit lebih sedikit dibandingkan dengan daya yang dibutuhkan oleh beban, frekuensi akan turun. Penurunan frekuensi ini bisa berbahaya jika tidak segera ditangani, karena dapat menurunkan efisiensi operasional dan dalam kondisi serius dapat menyebabkan pemadaman total (*blackout*).

Sebagai tanggapan terhadap penurunan frekuensi, sistem proteksi seperti *Under Frequency Relay* (UFR) dapat diaktifkan untuk melepaskan beban tertentu dengan tujuan mengembalikan frekuensi kembali ke kondisi normal. Berdasarkan hal tersebut maka, kami melakukan penelitian dengan judul “**Studi Pelepasan Beban Menggunakan Under Frequency Relay Pada Sistem Kelistrikan Sulbagsel Akibat Gangguan PLTA Yang Disebabkan Oleh Fenomena El Nino.**”

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana respon frekuensi pada sistem Sulbagsel pada saat kapasitas pembangkitan PLTA turun?
2. Bagaimana respon frekuensi setelah dilakukan skema *load shedding* pada saat kapasitas pembangkitan PLTA turun?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penulisan tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Menganalisis respon frekuensi pada sistem Sulbagsel pada saat kapasitas pembangkitan PLTA turun.
2. Menganalisis respon frekuensi setelah dilakukan skema *load shedding* pada saat kapasitas pembangkitan PLTA turun.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mengenai pengaturan optimal dari *Under Frequency Relay* dalam menghadapi gangguan akibat penurunan kapasitas pembangkitan PLTA yang diperlukan untuk menyesuaikan strategi pelepasan beban secara efisien dalam mempertahankan kestabilan frekuensi sistem.
2. Hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai referensi dalam pengembangan penelitian kedepannya.

1.5 Ruang Lingkup

Untuk mendapatkan hasil pembahasan yang terarah, maka perlu membatasi masalah yang akan dibahas. Adapun Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah:

1. Area sistem tenaga listrik yang digunakan sebagai objek penelitian adalah sistem kelistrikan Sulbagsel.
2. Jenis kestabilan yang disimulasikan merupakan kestabilan frekuensi,

3. Jenis gangguan yang digunakan adalah gangguan pada PLTA yang mengalami penurunan kapasitas pembangkitan di Sulbagsel.
4. Analisis yang dilakukan adalah analisis pemilihan dan jumlah beban yang harus dilepaskan untuk mengembalikan frekuensi sistem dalam kondisi normal.
5. Analisis keseluruhan sistem tenaga listrik menggunakan software DigSilent PowerFactory 15.1

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini membahas mengenai teori-teori penunjang yang digunakan dalam pembuatan tugas akhir ini. Teori tersebut mengenai pengetahuan umum terkait dengan sistem tenaga listrik, kestabilan sistem tenaga, stabilitas frekuensi, *Under Frequency Relay*, dan pelepasan beban yang diperoleh dari sumber ilmiah.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang lokasi penelitian, waktu penelitian, alat dan bahan yang digunakan, teknik pengumpulan data, metode analisis data dan diagram alur penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai hasil penelitian yang diperoleh serta pembahasan terkait penelitian yang dilakukan.

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab berisi simpulan dari hasil penelitian yang dilakukan beserta saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

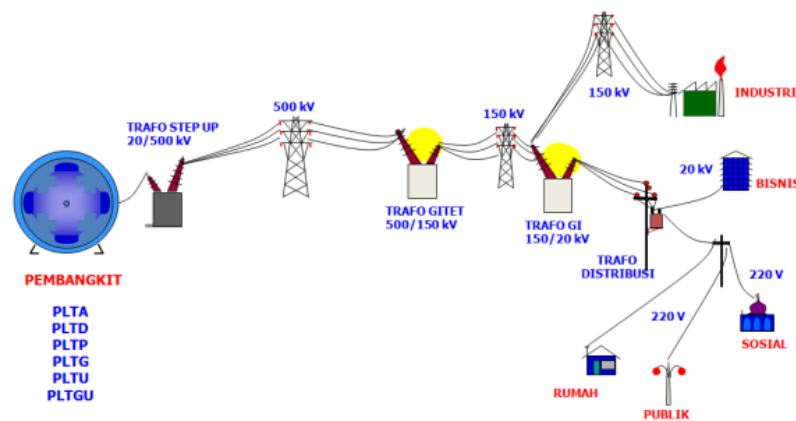
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Pada umumnya, sistem tenaga listrik dibagi menjadi tiga bagian utama, yaitu pembangkit tenaga listrik, penyaluran tenaga listrik, dan distribusi tenaga listrik. Ketiga bagian ini tidak dapat dipisahkan karena merupakan suatu sistem yang kompleks yang bekerja untuk menyalurkan daya dari pusat pembangkit ke pusat-pusat beban. Energi listrik yang dihasilkan pusat pembangkit listrik akan disalurkan melalui saluran transmisi kemudian melalui saluran distribusi sampai ke konsumen. Pusat pembangkit listrik (*Power Plant*) merupakan tempat pertama kali sistem listrik dihasilkan. Di sini terdapat turbin penggerak awal dan juga generator yang mengubah tenaga turbin menjadi sistem listrik. Proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkit melalui saluran distribusi hingga sampai pada konsumen dikenal sebagai transmisi tenaga listrik. Sistem distribusi adalah sub sistem tenaga listrik yang langsung berhubungan dengan pelanggan dan bertanggung jawab untuk menyalurkan tenaga listrik ke berbagai lokasi. Sistem ini terdiri dari gardu induk, gardu hubung, saluran tegangan menengah dan rendah, gardu distribusi tegangan, yang terdiri dari panel-panel pengatur tegangan menengah dan rendah, dan trafo (Patoding & Sau, 2019).

Unit pembangkitan, saluran transmisi, gardu induk, dan jaringan distribusi adalah beberapa komponen yang berhubungan sedemikian rupa untuk memenuhi kebutuhan listrik pelanggan sesuai kebutuhan. Gambar 1 menunjukkan gambaran umum skema sistem tenaga listrik.



Gambar 1 Skema sistem tenaga listrik

Sumber: (Suripto, 2017)

Unit pembangkitan adalah bagian dari sistem tenaga listrik yang terdiri dari generator pembangkit tenaga listrik yang digerakkan oleh turbin. Fungsinya adalah untuk menghasilkan energi primer dari berbagai sumber energi, seperti air, batu bara, panas bumi, atau minyak bumi. Level tegangan dalam sistem pembangkitan disesuaikan dengan spesifikasi dan kapasitas generator pembangkit yang digunakan. Karena besarnya arus yang mengalir berbanding terbalik dengan tegangan generator tertentu, pembangkit berkapasitas lebih besar biasanya menggunakan level tegangan yang lebih rendah untuk mencegah arus yang mengalir terlalu besar (Suripto, 2017).

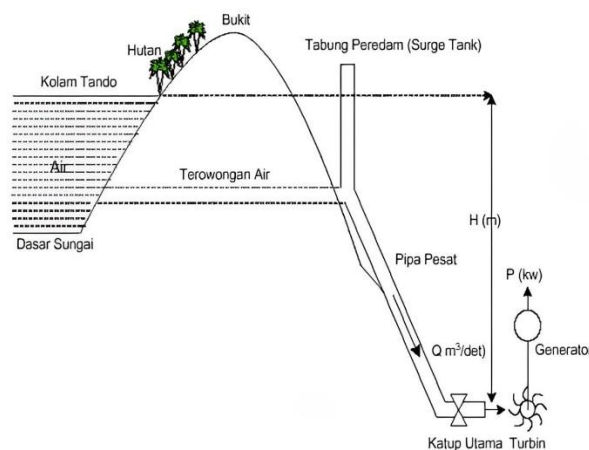
Energi listrik adalah salah satu cara yang paling ekonomis, mudah, dan aman untuk mengirimkan energi. Energi listrik kemudian dikirim melalui saluran transmisi bertegangan tinggi menuju pusat beban melalui transformator penaik tegangan, juga dikenal sebagai transformator *step-up*. Tegangan dinaikkan dengan tujuan untuk mengurangi jumlah arus yang mengalir pada saluran transmisi. Dengan demikian saluran transmisi bertegangan tinggi akan membawa aliran arus yang rendah untuk mengurangi rugi panas (*heat loss*) I^2R . Ketika saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan kembali diturunkan menjadi tegangan menengah melalui transformator *step-down*. Di pusat-pusat beban yang terhubung dengan saluran distribusi, energi listrik ini akan diubah lagi menjadi bentuk-bentuk energi lainnya seperti energi mekanis (motor), penerangan, pemanas, dan sebagainya (Zuhal, 2000).

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

Pembangkit listrik tenaga air (PLTA) adalah salah satu pembangkit listrik yang mengandalkan energi potensial dan kinetik untuk menghasilkan energi listrik. Energi listrik yang dibangkitkan dari hal ini disebut sebagai hidroelektrik. Empat komponen utama dari PLTA adalah adanya waduk atau bendungan, saluran pelimpah (pembawa air), *powerhouse*, dan serandang hubungan (*switchyard*) atau unit transmisi yang mengalirkan produksi listrik ke konsumen.

Bentuk utama pembangkit listrik tenaga air adalah motor yang dihubungkan ke turbin yang digerakkan oleh tenaga kinetik air. Namun, pembangkit listrik tenaga air umumnya tidak terbatas pada air dari sebuah waduk dan air terjun, tetapi juga termasuk pembangkit listrik yang menggunakan tenaga air.

PLTA bekerja dengan cara mengubah energi potensial air menjadi energi mekanik untuk menggerakkan motor dari energi mekanik menjadi energi listrik dengan bantuan generator. Turbin beroperasi untuk menghasilkan energi mekanik dari energi potensial. Air akan memukul sudut-sudut dari turbin sehingga turbin berputar. Perputaran turbin ini terhubung ke generator melalui poros dan *gearbox*. Perputaran turbin memutar kumparan magnet generator, menyebabkan pergerakan elektron yang menghasilkan arus AC. Pada gambar 2 memperlihatkan secara skematis bagaimana proses konversi energi pada PLTA, yaitu sejumlah air yang terletak pada ketinggian tertentu diubah menjadi tenaga mekanik dalam turbin.



Gambar 2 Proses Konversi energi pada PLTA
Sumber: (Marsudi, 2005)

Pembangkitan tenaga air menggunakan turbin air dan generator untuk mengubah tenaga air dari debit dan ketinggian tertentu menjadi tenaga listrik. Daya (*power*) yang dihasilkan dapat dihitung berdasarkan rumus berikut:

$$P = 9,8 H Q (\text{kW}) \quad (1)$$

dimana P = tenaga yang dikeluarkan secara teoritis

H = tinggi jatuh air efektif (m)

Q = debit air (m^3/s)

Berdasarkan persamaan (1), dapat diketahui bahwa daya yang dihasilkan diperoleh dari hasil kali dari tinggi jatuh dan debit air. Oleh karena itu, keberhasilan pembangkitan tenaga air tergantung pada kondisi geografis, tingkat curah hujan, dan area (penampungan) aliran (*catchment area*) (Arismunandar & Kuwahara, 2004).

Pusat listrik tenaga air terdiri dari bendungan, waduk, saluran air, dan sentral daya, bersama dengan peralatannya. Bendungan dibuat dari tanah, batu, atau beton yang dibangun melintasi sungai. Dengan adanya waduk besar, beban dapat didistribusikan secara merata (Kadir, 2010).

2.3 Kestabilan Sistem Tenaga Listrik

Kestabilan sistem merupakan bagian yang perlu dijaga dalam operasi sistem tenaga. Stabilitas sistem didefinisikan sebagai kemampuan sistem tenaga yang memungkinkan sistem tersebut untuk tetap berada pada kondisi dalam batas operasi yang diinginkan pada keadaan normal atau abnormal di sistem tenaga.

Sistem tenaga listrik yang andal adalah sistem tenaga yang dapat melayani beban secara kontinyu dengan tegangan dan frekuensi yang konstan. Fluktuasi tegangan dan frekuensi yang terjadi harus berada pada batas toleransi yang diizinkan agar peralatan listrik konsumen dapat bekerja dengan baik dan aman. Namun, pada prakteknya kondisi sistem yang benar-benar andal sebenarnya tidak pernah ada. Perubahan beban selalu terjadi dalam suatu sistem tenaga listrik. Penyesuaian oleh pembangkit akan dilakukan melalui governor dari penggerak mula dan eksitasi generator.

Dalam keadaan operasi yang stabil dari sistem tenaga listrik terdapat keseimbangan antara daya input mekanis pada prime mover dengan daya beban listrik pada sistem. Dalam keadaan ini semua generator berputar pada kecepatan sinkron. Hal ini terjadi bila setiap kenaikan dan penurunan beban harus diikuti dengan perubahan daya input mekanis pada prime mover dari generator-generator. Bila daya input mekanis tidak cepat mengikuti dengan perubahan beban dan rugi-rugi sistem maka frekuensi sistem dan tegangan akan menyimpang dari keadaan normal terutama jika terjadi gangguan, maka sesaat terjadi perbedaan yang besar antara daya input mekanis dan daya output listrik dari generator.

Kelebihan daya mekanis terhadap daya listrik mengakibatkan percepatan pada putaran rotor generator atau sebaliknya, bila gangguan tersebut tidak dihilangkan segera maka percepatan (*acceleration*) dan perlambatan (*deceleration*) putaran rotor generator akan mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dalam sistem.

Berdasarkan sifat dan besarnya gangguan, kestabilan biasanya digolongkan kedalam tiga jenis yaitu:

1. Kestabilan Keadaan Tetap (*Steady State Stability*)
2. Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)
3. Kestabilan Peralihan (*Transient stability*)

2.3.1 Kestabilan Keadaan Tetap

Kestabilan keadaan tetap mengacu pada kemampuan sistem tenaga listrik untuk menangani gangguan kecil yang terjadi secara bertahap di sekitar titik keseimbangan pada kondisi tetap. Kestabilan ini dipengaruhi oleh karakteristik komponen-komponen dalam sistem tenaga listrik, seperti pembangkit, beban, jaringan transmisi, dan sistem kontrol. Model pembangkit yang digunakan adalah model sederhana (sumber tegangan konstan), karena hanya berfokus pada gangguan kecil di sekitar titik keseimbangan. Sistem dianggap tidak stabil jika terjadi perubahan yang menyebabkan penyimpangan dari titik keseimbangan.

Ciri utama kestabilan jenis ini adalah pergeseran titik operasi dari kondisi aman menuju kondisi kritis akibat perubahan sistem yang berlangsung secara

perlahan namun terus-menerus. Contoh umum dari kestabilan jenis ini adalah kestabilan tegangan akibat perubahan beban. Secara teoritis, jika beban meningkat, tegangan pada bus beban akan menurun. Hubungan antara peningkatan beban dan penurunan tegangan bersifat linier. Namun, jika beban melebihi nilai tertentu yang disebut P_{max} , sistem akan menjadi tidak stabil, ditandai dengan penurunan tegangan yang drastis dan penurunan daya suplai karena generator kehilangan sinkronisasi (Kundur, 1994).

2.3.2 Kestabilan Dinamis (*Dynamic Stability*)

Kestabilan dinamis adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali ke titik keseimbangan setelah mengalami gangguan kecil yang mendadak dan berlangsung lama. Berbeda dengan kestabilan keadaan tetap, kestabilan dinamis lebih bergantung pada kecepatan dan akurasi respons peralatan kendali daripada pada pergeseran titik operasi. Oleh karena itu, analisis kestabilan dinamis lebih kompleks karena juga melibatkan perhitungan komponen kontrol otomatis. Dalam analisis ini, tidak hanya persamaan mekanik generator yang perlu dimodelkan, tetapi juga performa dinamis dari semua peralatan kendali di dalam generator harus diperhitungkan (Kundur, 1994).

2.3.3 Kestabilan Peralihan (*Transient stability*)

Kestabilan peralihan adalah kemampuan sistem untuk mencapai kembali titik keseimbangan atau sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar, seperti hubung singkat atau ketidaksinkronan generator, yang dapat menyebabkan sistem kehilangan kestabilannya karena gangguan tersebut berada di luar batas kemampuan sistem. Analisis kestabilan transien merupakan analisis utama untuk memahami perilaku sistem daya dalam situasi gangguan besar, seperti perubahan beban mendadak akibat terputusnya unit pembangkit, serta perubahan pada jaringan transmisi, misalnya gangguan hubung singkat atau pemutusan saklar (*switching*) (Kundur, 1994).

2.4 Stabilitas Frekuensi (*Frequency Stability*)

Stabilitas frekuensi mengacu pada kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan frekuensi yang stabil setelah terjadi gangguan sistem yang parah yang mengakibatkan ketidakseimbangan yang signifikan antara pembangkitan dan beban. Hal ini tergantung pada kemampuan untuk menjaga/memulihkan keseimbangan antara pembangkitan dan beban sistem, dengan kehilangan beban yang tidak disengaja seminimal mungkin. Ketidakstabilan yang mungkin timbul berupa perubahan frekuensi yang terus-menerus sehingga menyebabkan tersandungnya unit pembangkit dan/atau beban.

Gangguan sistem yang parah umumnya mengakibatkan lonjakan frekuensi, aliran daya, tegangan, dan variabel sistem lainnya yang besar, sehingga menimbulkan Tindakan proses, control, dan proteksi yang tidak dimodelkan dalam studi stabilitas transient. Umumnya, masalah stabilitas frekuensi dikaitkan dengan ketidakcukupan dalam respon peralatan, koordinasi yang buruk dari peralatan control dan proteksi, atau cadangan pembangkitan yang tidak mencukupi.

Selama kenaikan frekuensi, besaran tegangan dapat berubah secara signifikan, terutama untuk kondisi *islanding* dengan pelepasan beban di bawah frekuensi yang menurunkan frekuensi sistem. Perubahan besar tegangan yang mungkin lebih tinggi persentasenya daripada perubahan frekuensi, mempengaruhi ketidakstabilan pembangkitan beban (Kundur et al., 2004).

2.5 Hubungan Antara Frekuensi dan Daya Aktif

Sistem tenaga listrik harus mampu menyediakan tenaga listrik bagi para pelanggan dengan frekuensi yang praktis konstan. Penyimpangan frekuensi dari nilai nominal harus selalu dalam batas toleransi yang diperbolehkan. Daya aktif mempunyai hubungan erat dengan nilai frekuensi dalam sistem, sedangkan beban sistem yang berupa daya aktif maupun daya reaktif selalu berubah sepanjang waktu. Sehubungan dengan hal ini, maka untuk mempertahankan frekuensi dalam batas toleransi yang diperbolehkan, penyediaan/pembangkitan daya aktif dalam sistem harus disesuaikan dengan kebutuhan pelanggan atas daya aktif, harus

selalu disesuaikan dengan beban daya aktif. Penyesuaian daya aktif ini dilakukan dengan mengatur besarnya kopel penggerak generator.

Daya dalam gerak lurus dapat didefinisikan sebagai gaya yang dialami suatu benda yang bergerak pada jarak tertentu per satuan waktu. Hal ini juga berlaku bagi daya yang dihasilkan generator. generator memiliki bagian yang berputar, sehingga tinjauan daya yang dihasilkan generator adalah daya yang dihasilkan oleh suatu benda berputar dan bukan merupakan benda statis. Oleh sebab itu, daya yang dihasilkan generator dapat didefinisikan sebagai momen gaya (torsi) yang dialami genetaor yang berputar sebesar sudut tertentu per satuan waktu.

$$P = \tau \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

Dengan

P = daya yang dibangkitkan generator (Watt)

τ = momen gaya/kopel mekanik generator (Nm)

θ = sudut rotasi (rad)

t = waktu (s)

Besarnya perubahan sudut rotasi dari bagian generator yang berputar per satuan waktu merupakan nilai dari kecepatan sudut generator tersebut.

$$P = \tau \omega = \tau \cdot 2\pi f \quad (3)$$

$$P \approx \tau \quad (4)$$

Dari persamaan di atas terlihat bahwa perubahan daya aktif yang dibangkitkan generator akan menyebabkan perubahan torsi kerja. Perubahan torsi kerja ini akan mempengaruhi frekuensi sistem. Perubahan daya aktif yang dihasilkan generator terjadi apabila permintaan daya oleh beban berubah. Hal ini tidak boleh dibiarkan terjadi karena generator memiliki rentang frekuensi kerja tertentu. Ketika generator bekerja di luar rentang frekuensi kerja, maka generator tersebut akan cepat mengalami kerusakan. Oleh sebab itu, untuk mempertahankan

besarnya frekuensi sistem diperlukan pengaturan pada besarnya kopel mekanis penggerak generator (Marsudi, 2006).

2.6 Penurunan Frekuensi Akibat Gangguan Unit Pembangkit

Perubahan beban harus diikuti dengan perubahan daya penggerak generator. Permasalahan ini seringkali dialami oleh jaringan yang memikul pembebanan yang tinggi. Salah satu upaya yang dilakukan dengan melepaskan beban pada sistem namun hal ini seringkali berdampak kepada penurunan frekuensi yang cukup besar.

Dibutuhkan upaya untuk mengembalikan frekuensi sistem ke keadaan normal saat frekuensi menurun. PLN menggunakan frekuensi nominal 50 Hz. Tidak boleh lebih rendah dari 49,5 Hz atau lebih tinggi dari 50,5 Hz. Selama keadaan darurat (*emergency*) dan gangguan frekuensi sistem, frekuensi sistem dapat turun hingga 47,5 Hz atau naik hingga 52 Hz sebelum unit pembangkit diizinkan untuk berhenti beroperasi (Liliana & Aini, 2020).

Terjadinya penurunan frekuensi pada sistem dapat disebabkan karena lepasnya salah satu pembangkit yang berkapasitas besar dari sistem tenaga listrik maupun gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat mengakibatkan penurunan frekuensi dalam waktu singkat, setelah itu frekuensi dapat pulih dengan sendirinya dengan bantuan pengaturan governor. Sedangkan penurunan frekuensi akibat beban lebih yang sangat besar diperlukan pelepasan beban untuk memulihkan frekuensi. Faktor-faktor yang mempengaruhi laju penurunan frekuensi akibat terlepasnya unit pembangkit antara lain:

1. Konstanta Inersia
2. Daya Generator
3. Daya elektrik yang dibutuhkan beban
4. Respon generator

Salah satu faktor yang mempengaruhi besar laju penurunan frekuensi suatu generator adalah konstanta inersia. Semakin besar nilai konstanta inersia maka kemampuan suatu generator dalam mempertahankan diri menghadapi gangguan akan semakin tinggi. Nilai konstanta inersia keseluruhan generator, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$H_{sistem} = \frac{H_1 MVA_1 + H_2 MVA_2 + \dots + H_n MVA_n}{MVA_1 + MVA_2 + \dots + MVA_n} \quad (5)$$

dengan keterangan persamaan:

H_{sistem} = Konstanta Inersia Sistem (MJ/MVA)

H_n = Konstanta Inersia Generator (MJ/MVA)

MVA_n = Rating Generator (MVA)

Dengan notasi 1,2,...,n merupakan notasi urutan generator

Penambahan beban secara mendadak mempunyai dampak menurunkan frekuensi sistem, begitu pula apabila ada unit pembangkit yang terganggu dan trip dari sistem, dampaknya juga menurunkan frekuensi. Jika unit pembangkit yang trip membangkitkan daya sebesar P_s ke dalam sistem, maka pada saat unit ini trip dalam sistem terjadi kekurangan daya yang dibangkitkan sebesar P_s . Kekurangan daya inilah yang menyebabkan frekuensi turun.

$$\frac{df}{dt} = -\frac{f_0}{2H} \cdot P_{so} \quad (6)$$

Dimana:

f_0 = frekuensi sistem sebelum gangguan (Hz)

P_{so} = Daya yang dibangkitkan oleh pembangkit yang terganggu (MW)

Nilai $\frac{df}{dt}$ untuk nilai P_{so} dapat dihitung sesaat setelah gangguan terjadi. Tanda negatif menunjukkan penurunan frekuensi yang disebabkan oleh gangguan unit pembangkit yang sebelumnya menyumbangkan daya ke dalam sistem sebesar P_{so} .

$$\frac{P_{so}}{P_{GOT} - P_{SOT}} \quad (7)$$

dimana:

P_{GOT} = daya terpasang dalam MW dari unit-unit pembangkit yang beroperasi sebelum ada gangguan

P_{SOT} = daya terpasang dalam MW dari unit yang mengalami gangguan

$$\frac{df}{dt} = -\frac{f_0}{2H} \frac{P_{so}}{P_{GOT} - P_{SOT}} \quad (8)$$

Untuk menyederhanakan perhitungan, yaitu menghitung bagaimana frekuensi menurun sebagai fungsi waktu, dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Diambil selang waktu yang cukup kecil, misalnya 0,1 detik, dalam selang waktu ini nilai $\frac{df}{dt}$ dianggap konstan. Makin kecil selang waktu yang diambil, makin teliti perhitungan yang didapat.
- b. Pada akhir selang waktu pertama yang merupakan permulaan selang waktu yang kedua, yaitu pada saat t_1 , nilai frekuensi adalah:

$$f_1 = f_0 + \left(\frac{df}{dt}\right)_{0-1} \times (t_1 - t_0) \quad (9)$$

Dimana $\left(\frac{df}{dt}\right)_{0-1}$ adalah nilai $\frac{df}{dt}$ dalam selang waktu antara t_0 dan t_1 .

- c. Untuk selang waktu berikutnya yaitu antara t_1 dan t_2 harus dilakukan perhitungan untuk menghitung nilai awal frekuensi dan selisih daya yang dibangkitkan oleh beban:

$$\begin{aligned} P_{S1} &= P_1 - P_{B1} \\ &= (P_{G0} - P_{S0}) - P_{B1} \end{aligned} \quad (10)$$

Dimana P_1 adalah daya yang dibangkitkan pada saat t_1 yang dalam hal ini dianggap sama dengan $P_0 - P_{S0}$ karena dalam perhitungan ini diasumsikan bahwa governor belum bereaksi untuk menambah daya. Untuk memudahkan dalam menghitung P_{B1} dapat digunakan persamaan:

$$P_{B1} = \frac{f_1}{f_0} \times P_{B0} \quad (11)$$

Dimana:

P_{B0} = beban sistem sebelum gangguan (MW)

P_{B1} = beban sistem setelah gangguan (MW)

Dengan cara yang serupa seperti ketika menghitung nilai $\left(\frac{df}{dt}\right)_{0-1}$, maka:

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{1-2} = \frac{f_1}{2H} \frac{(P_{G0} - P_{S0}) - P_{B1}}{P_{G0T} - P_{S0T}} \quad (12)$$

Dimana, P_{G0} merupakan besar daya yang dibangkitkan dalam sistem sebelum gangguan (MW) (Marsudi, 2006).

2.7 *Under Frequency Relay*

Under Frequency Relay adalah relai pengaman jika frekuensi sistem turun hingga berada di luar batas yang diizinkan. Relai ini digunakan untuk membaca perubahan frekuensi dan mengatur sistem pelepasan sebagian beban setelah penurunan frekuensi terjadi. Relai ini lah yang akan digunakan untuk mengatur skema pelepasan beban.

Pada pelepasan beban yang diakibatkan adanya penurunan frekuensi maka dibutuhkan suatu komponen yaitu *Under Frequency Relay* (UFR) yang mampu mendeteksi ketidaknormalan tersebut. Sinyal ketidaknormalan tersebut dikirim ke pemutus tenaga yang terpasang di beban yang ingin dilepaskan. Untuk mendapatkan hasil yang maksimal perlu dilakukan beberapa pengaturan *Under Frequency Relay*, beberapa parameter yang harus diatur terlebih dahulu yaitu:

- a. Frekuensi kerja relai
- b. Waktu operasi relai
- c. Koordinasi dengan pemutus tenaga

Dalam menanggapi sinyal yang didapatkan *Under Frequency Relay*, relai membutuhkan waktu tunda untuk memastikan apakah penurunan tersebut disebabkan oleh beban atau faktor lain. Setelah memastikan bahwa penurunan disebabkan oleh beban lebih, relai juga membutuhkan waktu untuk beroperasi. Pada umumnya, laju penurunan frekuensi dipengaruhi oleh waktu operasi relai frekuensi. Sehingga untuk mendapatkan hasil yang optimal, pengaturan waktu tunda dapat disesuaikan dengan karakteristik relai.

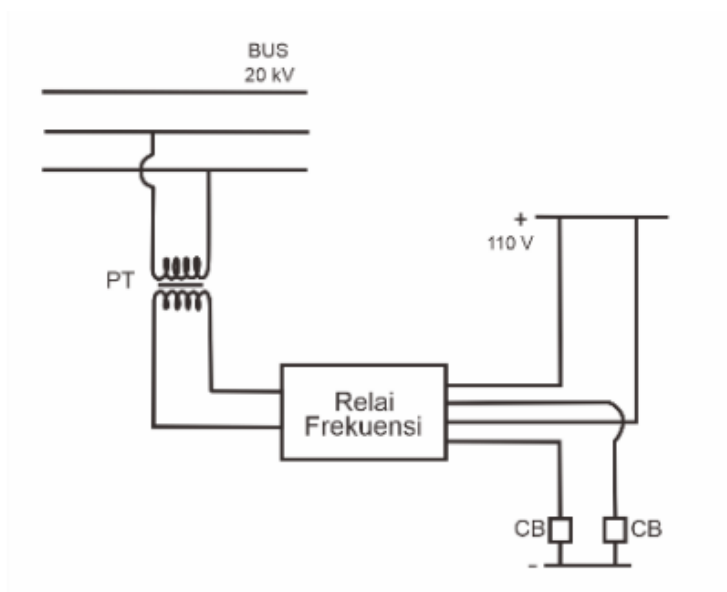
Apabila terjadi pelepasan beban diharapkan tidak terjadi kelebihan beban yang dilepaskan karena hal ini mengakibatkan kerugian bagi pembangkit maupun pengguna. Oleh sebab itu, diperlukan tahapan pelepasan beban untuk menghindari hal tersebut. Tahapan tersebut diatur dalam *Under Frequency Relay* (UFR).

Relai frekuensi berfungsi untuk memberikan sinyal kepada pemutus tenaga untuk membuka. Ketika pemutus tenaga bekerja maka beban yang terhubung dengannya lepas dari sistem. Oleh karena pemilihan beban yang akan dilepaskan berdasarkan prioritas nilai ekonomi dan keandalan sistem (Sucahyo, 2015).

2.7.1 Prinsip Kerja *Under Frequency Relay*

UFR merupakan suatu relai yang bekerja apabila terdapat inputan berupa frekuensi yang diatur dibawah frekuensi normalnya. UFR bekerja sesuai dengan *setting* yang ditentukan oleh pengguna. Setiap tipe dari UFR memiliki cara *setting* yang berbeda. Ada dua jenis *settingan* UFR yaitu berupa *switch digital* (Sofwan & Aditya, 2022).

Gambar 3 menunjukkan diagram pengawatan *Under Frequency Relay*



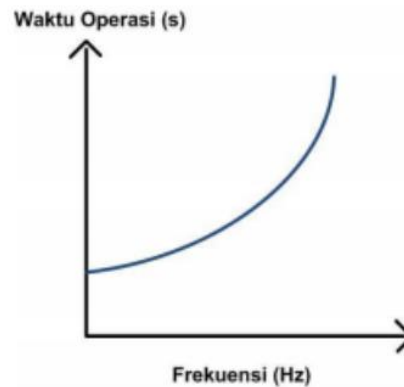
Gambar 3 Diagram pengawatan *under frequency relay*
Sumber: (Prasetya & Wartana, 2019)

Prinsip kerja *Under Frequency Relay* adalah sebagai berikut :

1. *Under Frequency Relay* mendapatkan sumber tegangan untuk bekerja melalui sumber tegangan DC sebesar 110 Vdc.
2. Apabila terjadi gangguan pada sistem yang menyebabkan frekuensi sistem menurun atau kurang dari 50 Hz, UFR akan membaca penurunan frekuensi melalui gelombang sinusoidal tegangan yang disuplai oleh pembangkit. Gelombang tegangan yang dimaksud adalah banyaknya tegangan 110 Volt yang terjadi selama periode gelombang tegangan satu detik.
3. Penurunan frekuensi akan dideteksi oleh UFR jika periode gelombang tegangan kurang dari 0,02 detik ($T=1/50$ Hz).

4. Apabila penurunan frekuensi telah mencapai pengaturan UFR, kontak akan diaktifkan. Ini akan memungkinkan relai untuk menyalurkan daya sebesar 110 Vdc ke *circuit breaker* dari sumber daya DC, yang akan membuka dan memisahkan penyulang dari sistem.

Kurva karakteristik *Under Frequency Relay* ditunjukkan dalam gambar 4 berikut:



Gambar 4 Kurva karakteristik *under frequency relay*
Sumber: (Sofwan & Aditya, 2022)

Waktu bekerjanya relay dipengaruhi oleh 3 faktor yaitu:

A. Waktu *pick-up*

Merupakan waktu yang dibutuhkan relay untuk mulai bekerja setelah terjadi penurunan frekuensi

B. Waktu relay

Merupakan waktu yang dibutuhkan relay untuk menghantarkan sinyal ke pemutus tenaga dan dihitung sejak terdeteksinya sinyal frekuensi *trip* hingga sinyal tersebut sampai dipemutus tenaga.

C. Waktu pemutus tenaga

Merupakan waktu yang dibutuhkan pemutus tenaga untuk menerima sinyal dari relay hingga pemutus tenaga buka dan beban yang dihubungkan ke jaringan oleh pemutus tenaga terlepas. Perhitungan waktu ini digunakan untuk menentukan perkiraan frekuensi akhir Dimana saat pelepasan beban dilakukan setelah frekuensi tertinggi untuk trip terdeteksi.

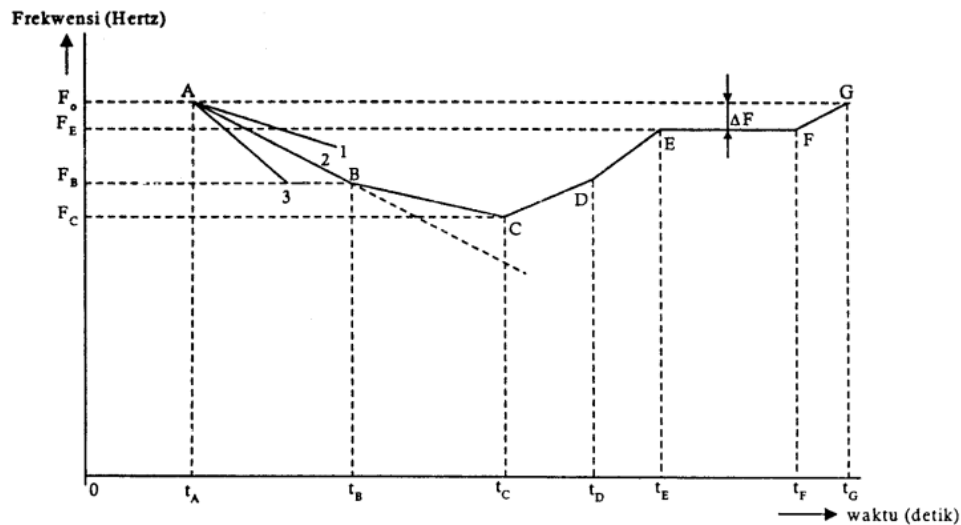
2.8 Pelepasan Beban

Jika terjadi gangguan dalam sistem yang menyebabkan daya yang tersedia tidak dapat melayani beban, misalnya karena terdapat unit pembangkit yang jauh, maka dilakukan pelepasan beban untuk mencegah sistem menjadi *collapsed*. Pelepasan beban merupakan suatu kondisi yang terjadi disuatu sistem tenaga listrik dengan mengizinkan adanya beberapa beban keluar dari sistem sehingga menghasilkan kestabilan sistem tenaga listrik. Kondisi jatuhnya salah satu unit pembangkit dapat dideteksi dengan adanya penurunan frekuensi sistem yang terjadi secara cepat.

Pada saat frekuensi turun pada level tertentu akibat adanya pembangkit yang trip, maka dilepaskan beban yang tidak begitu penting yang tidak menyebabkan operasi pengolahan terganggu. Pada setiap pembangkit, terdapat governor yang berfungsi untuk mengatur kecepatan turbin dengan mengendalikan kualitas bahan bakar yang masuk ke dalam ruang pembakaran di turbin. Jika frekuensi daya yang dibangkitkan bertambah atau berkurang, maka governor akan menurunkan atau menaikkan kecepatan turbin, sehingga mencapai kestabilan frekuensi (Marsudi, 2006).

Untuk mengimbangi berkurangnya pembangkit tenaga dari suatu sistem, maka sebagian beban sistem harus dilepaskan supaya pembangkit yang masih bekerja tidak turun dibatas yang diizinkan. Dalam situasi di mana daya pembangkit berkurang dari kapasitas yang tersedia, penurunan frekuensi akan terjadi secara bertahap dan dapat mengakibatkan kerusakan sistemik yang signifikan. Hal ini disebabkan karena governor pembangkit-pembangkit masih sempat bekerja dan daya cadangan panas yang ada atau *spinning reserve* digunakan (Cekdin, 2021).

Hal ini diilustrasikan dalam gambar 5 ketika terdapat unit pembangkit yang trip yang menyebabkan frekuensi turun.



Gambar 5 Perubahan frekuensi sebagai fungsi waktu dengan adanya pelepasan beban
Sumber: (Marsudi, 2006)

Garis 1, 2 atau 3 menunjukkan penurunan frekuensi sistem; semakin banyak unit pembangkit yang lepas atau *trip*, semakin cepat penurunan frekuensi. Nilai inersia sistem juga memengaruhi kecepatan penurunan frekuensi: semakin besar nilai inersia, semakin kokoh sistem, dan semakin lambat penurunan frekuensi.

Dalam gambar 5 dimisalkan garis 2 menunjukkan penurunan frekuensi sistem. Ketika sistem mencapai titik B, *Under Frequency Relay* (UFR) melakukan pelepasan beban tahap pertama. Ini dilakukan setelah mendeteksi penurunan frekuensi sistem mencapai F_B . Setelah pelepasan tahap pertama, kecepatan penurunan frekuensi berkurang. Sampai di titik C, *Under Frequency Relay* (UFR) akan melakukan pelepasan beban tahap kedua setelah mendeteksi frekuensi sebesar F_C .

Frekuensi sistem naik kembali ke titik D setelah pelepasan beban tahap kedua. Ini terjadi karena suplai daya lebih besar daripada beban yang dilayani setelah pelepasan beban tahap kedua. Mulai dari titik D, governor unit-unit pembangkit sistem mulai bekerja untuk melakukan pengaturan primer selama T_D berkisar selama 4 detik.

Periode transien, yang berlangsung kira-kira empat detik, digunakan sebelum governor melakukan pengaturan primer. Frekuensi sistem naik setelah governor melakukan pengaturan primer hingga mencapai F_E . Kemampuan governor melakukan pengaturan primer bergantung pada besarnya cadangan yang masih tersedia dalam sistem. Setelah mencapai titik E, frekuensi sistem yang

dinginkan masih mengalami penyimpangan sebesar F dari frekuensi F_0 . Penyimpangan ini dikoreksi oleh pengaturan sekunder governor yang dimulai pada titik F , dan frekuensi sistem kembali stabil pada titik G . Pelepasan beban tingkat pertama dapat mencegah sistem menjadi *collapsed* jika unit pembangkit yang lepas tidak terlalu besar. Akibatnya, penurunan frekuensi mungkin tidak mencapai nilai F_C (Marsudi, 2006).

2.8.1 Pelepasan Beban Akibat Penurunan Frekuensi

Untuk menjaga sistem dari kegagalan dikarenakan makin turunnya frekuensi, maka sebagian beban harus dilepaskan. Setelah sebagian beban dilepas, beban yang dipikul oleh pembangkit yang masih bekerja akan berkurang dan frekuensi akan dapat kembali ke keadaan normal segera setelah terjadi keseimbangan antara sisa pembangkit dan sisa beban. Saat frekuensi sistem mulai menurun, pelepasan beban sebagian harus dilakukan. Dengan pelepasan beban sebagian, beban pembangkit-pembangkit yang masih bekerja dapat terhindar dari kerusakan memungkinkan pelayanan terhadap beban yang tinggal dilakukan (Cekdin, 2021).

Standar yang digunakan untuk pelepasan beban ini ada dua yaitu:

1. Load Shedding 3 Tahap (ANSI/IEEE std C37.106-1987)

Tabel 1 Standar *Load Shedding* 3 Tahap

Tahap	Titik Trip Frekuensi (Hz)		%	Persentase Beban yang Dilepaskan	Waktu Tunda (Cycles) pada Relay
1	59.3	49.41	98.83	10	6
2	58.9	49.08	98.16	15	6
3	58.5	48.75	97.5	Sesuai kebutuhan untuk menahan penurunan sebelum 48.5 Hz (97%)	

2. Load Shedding 6 Tahap (ANSI/IEEE std C37.106-1987)

Tabel 2 Standar *Load Shedding* 6 Tahap

Tahap	Titik Trip		%	Persentase Beban yang Dilepaskan	Waktu Tunda (Cycles) pada Relay
	Frekuensi (Hz)				
1	59.5	49.58	99.16	10	6
2	59.5	49.58	99.16	10	6
3	58.8	49	98	5	6
4	58.8	49	98	5	14
5	58.4	48.65	97.3	5	14
6	58.4	48.65	97.3	5	21

Menurut standar ANSI/IEEE C37.106-1987 terdapat dua skema yaitu skema pelepasan beban dengan 3 tahap dan skema pelepasan beban dengan 6 tahap. Standar ANSI/IEEE C37.106-1987 menggunakan frekuensi 60 Hz, namun dalam tugas akhir ini menggunakan frekuensi 50 Hz sehingga perlu mengubah standar ANSI/IEEE C37.106-1987 untuk digunakan pada frekuensi 50 Hz.

2.8.2 Jenis Pelepasan Beban

Pelepasan beban pada umumnya terdiri dari dua jenis, yaitu pelepasan beban secara manual (dilakukan langsung oleh operator) dan pelepasan beban secara otomatis (*automatic load shedding*) (Kurniawan, dkk, 2020):

1. *Manual load shedding*

Pelepasan beban secara manual hanya digunakan pada saat *control load shedding* (pengontrol pelepasan beban) tidak bekerja sebagaimana mestinya (tidak dalam keadaan normal).

2. *Automatic Load Shedding*

Sistem pelepasan beban otomatis merupakan sistem pengamanan menggunakan *Under Frequency Relay* (UFR). Beban-beban yang akan dilepas sebelumnya harus ditentukan terlebih dahulu dan akan secara bertahap pada tiap-

tiap rentang frekuensi yang telah ditentukan. Faktor-faktor yang perlu diperhatikan dalam menentukan pelepasan beban diantaranya:

- a. Seberapa besar beban sistem yang akan dilepas pertahapannya.
- b. Menentukan jumlah tahapan pelepasan beban berdasarkan kemampuan sistem
- c. Pengaturan waktu tunda yang direncanakan pada setiap waktu pelepasan
- d. Frekuensi dimana setiap tahapan pelepasan beban

2.9 Indeks Kekuatan Sistem (IKS) Sulbagsel

Untuk menentukan nilai indeks kekuatan sistem Sulbagsel, dilakukan simulasi gangguan pembangkit yang menyebabkan frekuensi sistem turun. Indeks Kekuatan Sistem (IKS) merupakan aspek penilaian sebuah sistem interkoneksi agar dapat mengetahui batasan nilai kekuatan sistem ketika mengalami gangguan. IKS disusun berdasarkan rekapitulasi dari gangguan yang terjadi pada pembangkit pada suatu waktu tertentu yang menyebabkan turunnya frekuensi.

Menurut UPB Sulselrabar, persamaan yang digunakan untuk menentukan Indeks Kekuatan Sistem (IKS) adalah sebagai berikut:

1. Persamaan untuk menghitung besar penurunan frekuensi (df), yaitu:

$$df \text{ (Hz)} = f_{awal} - f_{akhir} \quad (16)$$

2. Persamaan untuk menghitung IKS $[MW/Hz] = dP/df \quad (17)$

Dimana :

df = Besar penurunan frekuensi saat terjadi gangguan

dP = Besar daya yang hilang saat pelepasan pembangkit

Setelah diperoleh data laju penurunan frekuensi akibat hilangnya pasokan daya dari unit pembangkit yang trip, dengan menggunakan grafik regresi Linier maka akan didapatkan Indeks Kekuatan Sistem Sulbagsel. (Marwan dkk, 2019)

2.10 Software DigSilent (*Digital Simulation of Electrical Network*)

Program perhitungan *DigSilent PowerFactory* adalah software rekayasa yang berguna untuk analisis industri, utilitas, dan analisis sistem tenaga listrik. *DigSilent (Digital Simulation and Electrical NeTwork calculation program)* merupakan perangkat lunak analisis system tenaga yang pertama di dunia yang terintegrasi dengan grafis antar muka satu baris, diagram satu baris interaktif juga termasuk fungsi menggambar, kemampuan mengedit dan semua relevan statis dan dinamis fitur perhitungan. Beberapa fungsi yang tersedia dalam *DigSilent PowerFactory* adalah analisis aliran beban (*load flow analysis*), perhitungan arus pendek (*short circuit calculation*), analisis harmonik (*harmonic analysis*), koordinasi proteksi (*protection coordination*), perhitungan stabilitas (*stability calculation*) dan analisis modal (*modal analysis*) (Latumahina dkk, 2023).

DigSilent (Digital Simulation of Electrical Network) PowerFactory adalah software analisis sistem tenaga yang digunakan untuk menganalisis sistem pembangkitan, transmisi, distribusi, dan sistem industri. *Software* ini menganalisis berbagai fitur, mulai dari fitur standar hingga fitur yang sangat canggih seperti pembangkit tenaga angin, *distributed generation*, simulasi *real-time* dan pemantauan kinerja untuk pengujian serta pengawasan sistem tenaga listrik. *DigSilent* dirancang untuk memenuhi tujuan analisis kontrol, perencanaan dan optimisasi operasi sistem tenaga listrik (Wirmen, 2019).

2.11 Penelitian Terdahulu yang Terkait

Dengan dilakukannya penelitian ini, penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan sangat penting sebagai referensi untuk menunjang pengembangan penelitian ini. Berikut beberapa penelitian terdahulu yang memiliki relevansi dengan penelitian yang akan dilakukan, antara lain:

1. Penelitian Rizal Dicky Prasetya, I Made Wartana (2019) dengan judul “Analisis *Load Shedding* pada Sistem Kelistrikan Bali Akibat Lepasnya kabel Laut Jawa-Bali 150 kV”

Penelitian ini mengkaji penggunaan *Under Frequency Relay* untuk pelepasan beban dengan menggunakan *Software ETAP Power Station 12.6* berdasarkan standar ANSI/IEEE C37.106-2003 yang menetapkan batas *Under*

Frequency antara 50 hingga 49,5 Hz. Fokus analisis adalah pada Sistem Bali 150 kV, dengan studi kasus pemutusan SKLT Jawa-Bali 150 kV. Dalam kasus pemutusan SKLT, kehilangan daya suplai sebesar 80 MW menyebabkan penurunan frekuensi hingga 48,16 Hz. Waktu delay pelepasan beban yang dibutuhkan oleh relay dihitung sebesar 0,3001 detik, dengan dua tahap *Load Shedding* pada frekuensi 49,5 Hz. Perhitungan menunjukkan bahwa frekuensi pada 49,21 Hz memerlukan pelepasan beban sebesar 65,1 MW. Setelah pelepasan beban, frekuensi berhasil meningkat dan stabil pada batas yang diizinkan, yaitu 49,6 Hz, dengan waktu pemulihan 11 detik. Meskipun penelitian ini memiliki kesamaan dalam penggunaan UFR untuk pelepasan beban, perbedaannya terletak pada lokasi pengambilan data dan perangkat lunak yang digunakan. Pada penelitian ini, simulasi dilakukan menggunakan DigSilent PowerFactory 15.1.

2. Penelitian Fajar Risky Kurniawan, I G. Dyana Arjana, Rukmi Sari Hartati (2020) dengan judul “Analisis Kinerja *Under Frequency Relay* pada Subsistem Kelistrikan Bali Saat Kondisi *Island Operation*”

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja *under frequency relay* (UFR) yang terpasang di sistem Bali dalam menangani gangguan beban lebih, khususnya pemadaman generator sesuai dengan skenario yang telah ditentukan. Metode yang digunakan melibatkan pemodelan skema pelepasan beban dengan UFR pada perangkat lunak dan menjalankannya sesuai skenario yang ada. Skenario tersebut mencakup gangguan yang mengakibatkan salah satu atau lebih generator mengalami pemadaman. Hasil analisis menunjukkan bahwa UFR yang terpasang di sistem Bali tidak mampu mengembalikan frekuensi sistem ke keadaan normal. Sistem mengalami kekurangan daya pembangkitan dengan frekuensi steady-state di bawah 49,8 Hz pada skenario gangguan ke-3, ke-4, dan ke-5, sementara pada skenario gangguan ke-9 dan ke-10, sistem mengalami kelebihan daya pembangkitan dengan frekuensi steady-state di atas 50,2 Hz. Persamaan penelitian ini adalah penggunaan *Under Frequency Relay* untuk pelepasan beban dengan software yang digunakan adalah DigSilent PowerFactory 15.1. Perbedaan diantara kedua penelitian ini adalah pada penelitian terdahulu lokasi penelitian pada subsistem kelistrikan Bali sedangkan lokasi penelitian ini pada sistem kelistrikan Sulbagsel.

3. Penelitian Agus Sofwan dan Indra Aditya (2022) dengan judul “Analisa Pelepasan Beban Oleh *Under Frequency Relay* Berbasis Simulasi Pada Sistem Tenaga Listrik Jawa Bali”

Penelitian ini bertujuan untuk mengkajian program pelepasan beban (*Load Shedding*) yang dibuat tahun 2014 dan masih digunakan sampai saat ini yang sebaiknya diperbaharui secara periodik minimal satu tahun sekali agar kesesuaian skema pelepasan beban dengan target beban yang dilepas selalu terjaga. Program pelepasan beban SJB tahun 2014 dihitung dengan data beban puncak SJB tahun 2013 sebesar 22.567 MW dengan Indeks Kekuatan Sistem sebesar 718,49 MW/Hz, sedangkan realisasi BP SJB tahun 2015 adalah sebesar 24.258 MW. Berdasarkan kondisi tersebut maka dilakukan studi simulasi mengenai pelepasan beban oleh rele under frekuensi menggunakan software Digsilent 14.1.3 dengan hasil bahwa skema pelepasan beban 2015 total sebanyak 7 tahapan adalah sebesar 6.179 MW yang didasari atas prioritas area. Dengan demikian, akan terjaga kestabilan antara pembangkitan dengan jumlah beban yang harus dilayani. Untuk itu, akan dianalisa dalam penulisan ini tentang pelepasan beban oleh *under frequency* berbasis simulasi pada sistem Tenaga Listrik Jawa Bali. Persamaan dari kedua penelitian ini yaitu pada penelitian terdahulu melakukan pelepasan beban dengan UFR. Sementara perbedaan dari kedua penelitian ini adalah pada penelitian terdahulu menggunakan software DigSilent 14.1.3 dengan lokasi penelitian sistem kelistrikan Jawa Bali sedangkan penelitian ini menggunakan software DigSilent 15.1 dengan lokasi penelitian sistem kelistrikan Sulbagsel.