

Strategi Operasi *Load Shedding* dan *Islanding* *Stiffness* Sistem Tenaga Listrik pada Kondisi *Edge Emergency*

MOHAMMAD SALMAN ABDURROHIM, HADI SUYONO*, RINI NUR HASANAH

Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia

*Email: hadis@ub.ac.id (Corresponding Author)

Received 22 Januari 2024 | Revised 14 Februari 2024 | Accepted 6 Maret 2024

ABSTRAK

Penelitian ini mengeksplorasi elemen-elemen krusial dalam menjaga stabilitas sistem tenaga pada kondisi edge emergency, yang terkait erat dengan penjagaan keseimbangan dan pemulihan frekuensi yang cepat setelah terjadinya gangguan. Pengelolaan pasokan listrik dan mempertahankan integritas sistem tenaga listrik, serta strategi load shedding dan operasi islanding, menjadi salah satu upaya untuk menjaga stabilitas. Respons cadangan berputar pada operasi islanding, terutama dalam menyesuaikan daya aktif selama gangguan, memiliki peran krusial untuk menjaga respon kestabilan sesuai batasan edge maksimum dan minimum. Pemodelan mekanisme skema load shedding dan operasi islanding dengan trigger dari stiffness kondisi edge maksimum tercapai dengan menjaga nilai overfrequency dibawah 51,5 Hz dengan nilai frekuensi tertinggi sebesar 51,473 HZ, sedangkan edge minimum tercapai dengan menjaga nilai underfrequency diatas 47,5 Hz dengan nilai frekuensi terendah sebesar 47,517 Hz.

Kata kunci: *load shedding, islanding, stiffness, edge maksimum, edge minimum*

ABSTRACT

This study explores crucial elements in maintaining power systems stability during edge emergency condition, closely related to maintaining balance and rapid frequency recovery after disturbances. Efforts aimed at ensuring stability include managing electrical supply, preserving power system integrity, as well as implementing load shedding and islanding operations. Spinning reserve response in islanding operation, particularly in adjusting active power during disturbances, plays a crucial role in maintaining stability responses within specified maximum and minimum edge constraints. Modeling of load shedding schemes and islanding operations triggered by the stiffness conditions of maximum edge condition is achieved by maintaining the overfrequency value below 51.5 Hz, with the highest frequency value being 51.473 Hz. Meanwhile, the minimum edge condition is achieved by maintaining the underfrequency value above 47.5 Hz, with the lowest frequency value being 47.517 Hz.

Keywords: *load shedding, islanding, stiffness, maksimum edge, minimum edge*

1. PENDAHULUAN

Kestabilan sistem tenaga bergantung pada pemeliharaan keseimbangan dan pemulihan yang cepat setelah terjadi gangguan. Dalam kondisi stabil, terdapat keseimbangan antara daya masukan dari penggerak utama dan daya keluar ke beban, yang memerlukan sinkronisasi frekuensi antar generator (**Abbas, dkk, 2022**). Tantangan utama dalam menjaga stabilitas adalah adanya gangguan, baik yang bersifat kecil seperti perubahan beban terus-menerus, maupun yang bersifat besar seperti pelepasan pembangkit, short circuit, dan pelepasan beban besar yang berpotensi menyebabkan ketidakstabilan frekuensi (**Shrestha & Gonzalez-Longatt, 2021**). Tujuan utama otoritas sistem tenaga listrik mencakup pengoperasian dan pemeliharaan sistem tenaga, mengelola pasokan tenaga listrik, dan mengawasi pemeliharaan transmisi tenaga listrik. Untuk mencapai tujuan ini, diperlukan studi terus-menerus guna meningkatkan kualitas sistem tenaga (**Alvarez-Alvarado, dkk, 2022**).

Kehilangan generator atau pembangkit, baik berupa satu unit ataupun beberapa unit pembangkit dengan kapasitas yang sudah direncanakan pada sistem operasi, akan dapat berdampak pada stabilitas sistem. Meskipun sistem seharusnya dapat kembali ke kondisi normal setelah adanya *recovery* sistem pada saat kegagalan terjadi, waktu interupsi kritis akan sedikit lebih lama setelah peningkatan kapasitas generator (**Lackovic, 2017**). Keseimbangan antara suplai dan beban tenaga listrik sangat berpengaruh terhadap kestabilan frekuensi sistem. Kondisi di mana gangguan terjadi dan dilanjutkan dengan pelepasan pembangkit sementara beban tetap, maka akan menyebabkan frekuensi sistem turun. Demikian juga, jika terjadi gangguan yang menyebabkan pelepasan beban sementara suplai tenaga listrik tetap, maka akan menyebabkan respon frekuensi sistem naik. Kedua kondisi ini terkadang akan terjadi sampai frekuensi melebihi batas maksimum dan minimum frekuensi sistem yang diizinkan, yang disebut dengan *edge emergency condition* (kondisi batas emergensi). Menjaga sistem ketika mengalami kondisi emergensi yang menyebabkan *over* atau *under frequency* sesuai batasan standar dapat menghindari kerusakan peralatan elektronik. Kerugian paling parah adalah *blackout*, yang disebabkan oleh bekerjanya sistem proteksi karena ketidakmampuan pembangkit untuk mengembalikan frekuensi pada keadaan normal. Oleh karena itu, diperlukan strategi operasi yang tepat untuk menjaga perubahan frekuensi sistem tidak melebihi batas *edge emergency*.

Interkoneksi sistem dapat meningkatkan stabilitas dengan waktu pemulihan frekuensi yang lebih cepat setelah gangguan (**Başkarad, dkk, 2024**). Untuk mengatasi masalah minimum frekuensi saat kondisi *edge emergency*, strategi *Under Frequency Load Shedding* (UFLS) digunakan untuk melepaskan sebagian beban menggunakan relay frekuensi, menjaga stabilitas dengan menyesuaikan pengurangan frekuensi akibat ketidakseimbangan daya suplai dan konsumsi beban (**Sauhats, dkk, 2021**). Operasi *islanding*, yang mengisolasi sebagian sistem, memperumit operasi karena segmen terisolasi harus menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan beban secara mandiri, memerlukan strategi kontrol yang canggih dan koordinasi antar generator untuk mencegah penyimpangan frekuensi (**Islam, dkk, 2021**) (**Abo-Khalil, dkk, 2023**)

Spinning reserve, generator cadangan untuk merespons perubahan permintaan atau pemadaman yang tiba-tiba, sangat penting dalam mempertahankan stabilitas sistem kelistrikan (**Tür, dkk, 2017**). Kapasitas *spinning reserve* yang lebih besar memungkinkan penyesuaian daya aktif yang lebih efektif dengan perubahan frekuensi yang lebih lambat, sementara kapasitas yang lebih kecil merespons perubahan daya aktif lebih cepat namun memerlukan tindakan korektif yang lebih cepat pula untuk menjaga stabilitas (**Chathurika, dkk, 2020**). Memahami peran *spinning reserve* dalam menyesuaikan daya aktif dan standar

batasan operasi pembangkit generator kunci dalam merancang strategi kontrol yang efektif untuk mencegah perubahan frekuensi selama gangguan (**Shazon, dkk, 2022**)(**Al Kez, dkk, 2023**) Standar ini menetapkan batasan tertentu untuk menjaga stabilitas sistem kelistrikan dan menghindari kemungkinan terjadinya kegagalan sistem yang dapat membahayakan pasokan listrik. Oleh karena itu, pengetahuan yang mendalam tentang batasan operasi pembangkit generator menjadi landasan untuk pengembangan strategi kontrol yang efisien dan keberlanjutan operasi sistem kelistrikan secara keseluruhan.

Operasi *islanding stiffness* diadopsi pada penelitian ini merujuk pada kemampuan sistem kelistrikan untuk membentuk *island* terisolasi secara otomatis sebagai respons terhadap *trigger* dari perubahan *stiffness* dalam sistem. Dalam operasi ini, pembentukan *island* terjadi sebagai akibat dari perubahan frekuensi sistem yang disebabkan oleh pemutusan (*trip*) pada pembangkit besar. Frekuensi sistem turun hingga mencapai frekuensi operasi *islanding*, yang memicu pembentukan *island*, dan pembangkit yang memiliki *spinning reserve* bekerja untuk mengembalikan sistem ke kondisi stabil (**Al Hosani, dkk, 2015**). Operasi *islanding stiffness* dalam kondisi *edge emergency* diperlukan untuk menjaga agar frekuensi yang dihasilkan oleh pembangkit cadangan tetap beroperasi dalam batas standar. Ketika sistem beroperasi dalam mode *islanding*, pengoperasian daya aktif pada pembangkit cadangan secara berlebihan dapat menyebabkan *overfrequency*, sedangkan operasi daya aktif yang kurang dapat menyebabkan *underfrequency*. Pendekatan komprehensif yang mengintegrasikan *load shedding*, operasi *islanding*, dan respons *spinning reserve* terhadap perubahan frekuensi sangat penting untuk memastikan pasokan daya yang berkelanjutan dan dapat diandalkan.

Strategi operasi sebagaimana telah dipaparkan di atas akan menjadi perhatian (*concern*) untuk dapat diterapkan pada sistem kelistrikan Lombok yang menjadi objek pada penelitian ini. Setelah beroperasinya pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) Lombok sebanyak 3 unit pada tahun 2023, dengan total kapasitas 3 x 50 MW yang menjadi penopang utama sistem kelistrikan Lombok, diperlukan kajian lebih mendalam terkait sistem proteksi untuk mengetahui kestabilan sistem jika terjadi gangguan pada pembangkit tersebut. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi stabilitas sistem dalam menghadapi gangguan, khususnya terkait kestabilan frekuensi. Hal ini menjadi penting karena ketika terjadi gangguan yang menyebabkan pelepasan pada pembangkit, menggunakan mekanisme operasi pembangkit dan proteksi yang sudah ada, akan berpotensi menyebabkan *blackout* karena ketidakmampuan pembangkit cadangan untuk merespon perubahan. Oleh karena itu, diperlukan mekanisme operasi sistem proteksi yang memadai dan operasi yang lebih efisien untuk pembangkit cadangan agar mampu merespon perubahan dengan baik.

Penelitian ini akan menganalisis bagaimana mengatasi gangguan generator lepas pada kondisi *edge emergency* dengan menggunakan strategi pelepasan beban dan operasi *islanding*. Dengan demikian, diharapkan bahwa saat terjadi *blackout* pada sistem jaringan, beban tetap dapat menerima pasokan listrik secara optimal. Langkah-langkah operasional yang tepat akan diuji melalui simulasi menggunakan perangkat lunak profesional DigSILENT. Simulasi ini akan membantu dalam mengidentifikasi potensi masalah dan merancang strategi yang efektif untuk menjaga kestabilan sistem kelistrikan, terutama pada saat kondisi gangguan yang menyebabkan *edge emergency*.

1.1 Penurunan Frekuensi Karena Gangguan Terhadap Pembangkit

Unit pembangkit yang terganggu dan lepas (*trip*) dari sistem mempunyai dampak penurunan frekuensi sistem, begitu pula penambahan beban secara mendadak, akan berdampak kepada penurunan frekuensi sistem. Untuk mendapatkan besar penurunan frekuensi digunakan persamaan:

$$\frac{df}{dt_{(0-1)}} = \frac{f_0}{2H} \frac{P_{SO}}{P_{GOT} - P_{SOT}} \quad (1)$$

Dimana f_0 adalah frekuensi nominal sistem (Hz), H adalah konstanta inersia (detik), P_{SO} adalah daya yang dibangkitkan unit yang mengalami gangguan (MW), P_{GOT} adalah total kapasitas seluruh pembangkit (MW), dan P_{SOT} adalah kapasitas pembangkit yang mengalami gangguan (MW).

Pada akhir selang waktu yang pertama merupakan permulaan selang waktu kedua, yaitu saat t_1 , nilai frekuensinya adalah :

$$f_1 = f_0 + \left[\left(\frac{df}{dt} \right)_{0-1} (t_1 - t_0) \right] \quad (2)$$

Dalam selang waktu antara t_0 dan t_1 nilai df/dt dianggap konstan, untuk selang waktu berikutnya yaitu antara t_1 dan t_2 dilakukan perhitungan menentukan nilai selisih daya yang dibangkitkan dengan beban :

$$\left(\frac{df}{dt} \right)_{1-2} = \frac{f_1}{2H} \frac{(P_{GO} - P_{SO}) - P_{B1}}{P_{GOT} - P_{SOT}} \quad (3)$$

Dimana P_{GO} adalah beban sistem setelah gangguan dan P_{B1} adalah daya yang dibangkitkan dalam sistem sebelum ada gangguan dari unit. Perhitungan berikutnya dapat dilakukan seterusnya yang serupa untuk selang waktu berikutnya.

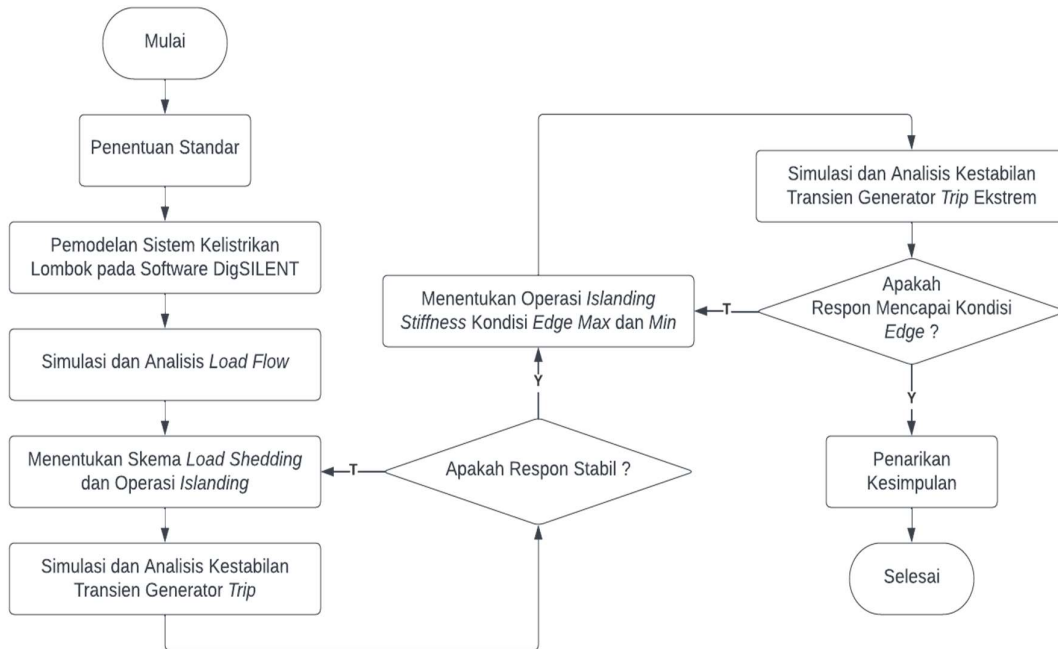
1.2 *Under Frequency Load Shedding* dan Operasi *Islanding*

Under Frequency Load Shedding (UFLS) adalah strategi pengelolaan beban otomatis yang diimplementasikan saat frekuensi dalam sistem tenaga listrik turun di bawah batas ambang tertentu, yang dapat disebabkan oleh kegagalan pembangkit atau beban yang berlebihan. Tujuannya adalah menjaga stabilitas dengan mengurangi beban secara selektif saat frekuensi turun, mencegah ketidakstabilan yang lebih besar. Sedangkan *Islanding* adalah kondisi di mana sebagian sistem tenaga listrik terisolasi mandiri dari grid utama tetapi tetap beroperasi secara independen, baik secara sengaja maupun tidak sengaja. Dalam konteks UFLS, *islanding* dapat terjadi ketika sebagian sistem diisolasi setelah pelepasan beban untuk menjaga stabilitas. Dalam situasi yang disengaja, *islanding* memungkinkan sistem beroperasi secara terisolasi untuk mempertahankan pasokan daya di wilayah tertentu, bahkan jika grid utama mengalami gangguan. Dalam kedua kasus, koordinasi dan kontrol yang cermat diperlukan untuk mencegah masalah stabilitas dan ketidakseimbangan daya di dalam "pulau" yang terisolasi.

2. METODE

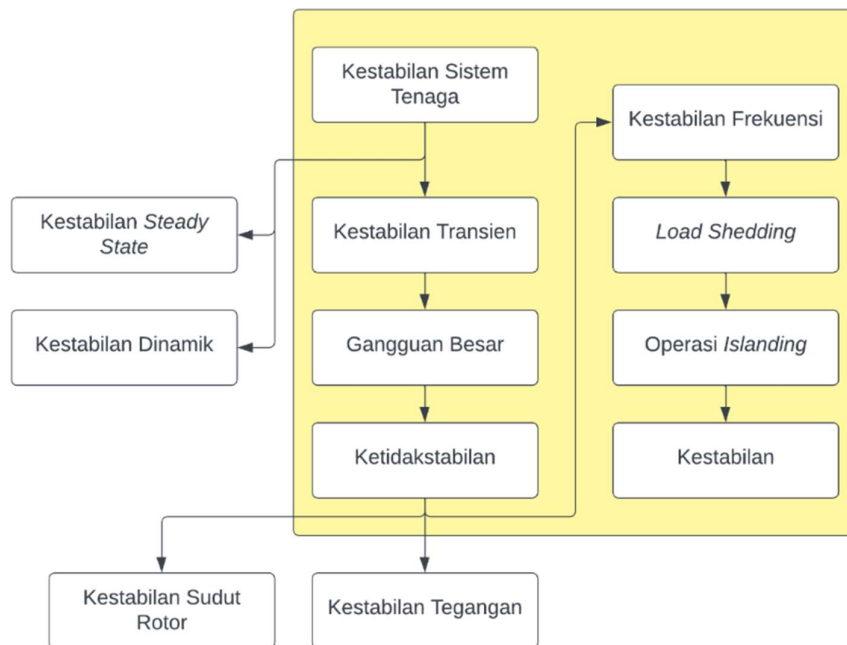
2.1 Diagram Alir Penelitian

Untuk mencapai sasaran penelitian, sebuah diagram alir telah disusun sebagaimana tergambar pada Gambar 1. Langkah-langkah dalam metodologi penelitian meliputi: Tahap 1, menentukan standar-standar yang berkaitan dengan regulasi dan kestabilan sistem; Tahap 2, pemodelan sistem kelistrikan Lombok dan validasi data dengan simulasi load flow; Tahap 3, menentukan skema dan prioritas load shedding, serta operasi islanding; Tahap 4, percobaan simulasi kestabilan transien generator trip dan penyesuaian terhadap skema load shedding dan operasi islanding; Tahap 5, penyesuaian operasi pembangkit load follower dan penarikan kesimpulan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Langkah-langkah dalam diagram alir pada Gambar 1 didasarkan pada prinsip-prinsip kestabilan yang terdapat dalam Gambar 2. Analisis kestabilan sistem tenaga dilakukan melalui penggunaan model kestabilan transien, yang berbeda dari model kestabilan *steady state* atau kestabilan dinamik. Kegagalan generator yang mengakibatkan trip dapat menyebabkan ketidakstabilan dalam sistem. Analisis kestabilan frekuensi kemudian dilakukan untuk mengidentifikasi ketidakstabilan ini, yang dapat diatasi dengan menggunakan *load shedding* dan operasi *islanding*. Pada akhirnya, diharapkan bahwa kestabilan sistem akan pulih dengan penerapan skema ini.



Gambar 2. Gambaran Umum Kestabilan Sistem Tenaga

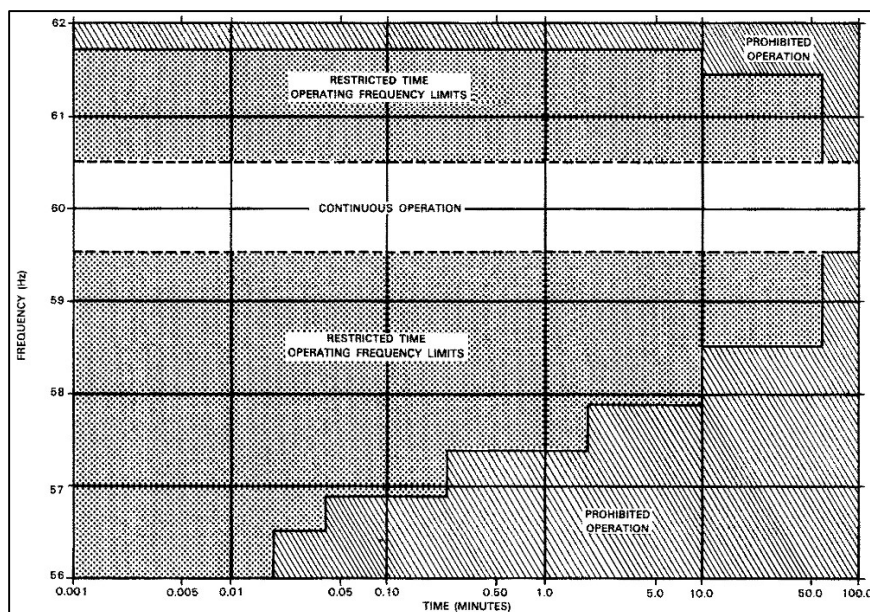
2.2 Penentuan Standar

Pada langkah ini dilakukan pengumpulan referensi yang terkait dengan kestabilan transien dan data mengenai sistem jaringan sistem kelistrikan Lombok. Rujukan ini diperoleh melalui studi literatur dari jurnal-jurnal dan buku teks yang relevan dengan topik pembahasan, sesuai dengan kondisi lapangan dan temuan penelitian sebelumnya. Penelitian ini menggunakan standar frekuensi yang telah ditetapkan oleh Kementerian ESDM dan PT PLN (Persero) yang dapat dilihat pada Tabel 1. Frekuensi nominal di jaringan yaitu 50 Hz. Frekuensi sistem dapat naik sampai dengan 52 Hz dan turun sampai dengan 47 Hz pada keadaan luar biasa.

Tabel 1. Batasan Operasi Frekuensi (Energi & Sumber Daya, 2020)

Rentang Frekuensi	Rentang Waktu Operasi
51,5 Hz < f ≤ 52, 0 Hz	Beroperasi selama paling singkat 15 menit
51,0 Hz < f ≤ 51,5 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
49,0 Hz ≤ f ≤ 51,0 Hz	Beroperasi secara terus-menerus
47,5 Hz < f < 49,0 Hz	Beroperasi selama paling singkat 90 menit
47,0 Hz < f ≤ 47,5 Hz	Beroperasi selama paling singkat 6 detik

Dalam penentuan keberhasilan *islanding* penelitian ini mengacu pada standar IEEE C37.106™-2003 tentang proteksi generator yang dikonversi menjadi sistem kelistrikan 50 Hz pada kondisi frekuensi abnormal sebagaimana tercantum pada Gambar 3 untuk mencegah kerusakan pada pembangkit *load follower* yaitu pembangkit listrik yang secara otomatis menyesuaikan produksi daya keluaran listrik sesuai dengan fluktuasi perubahan beban secara cepat.

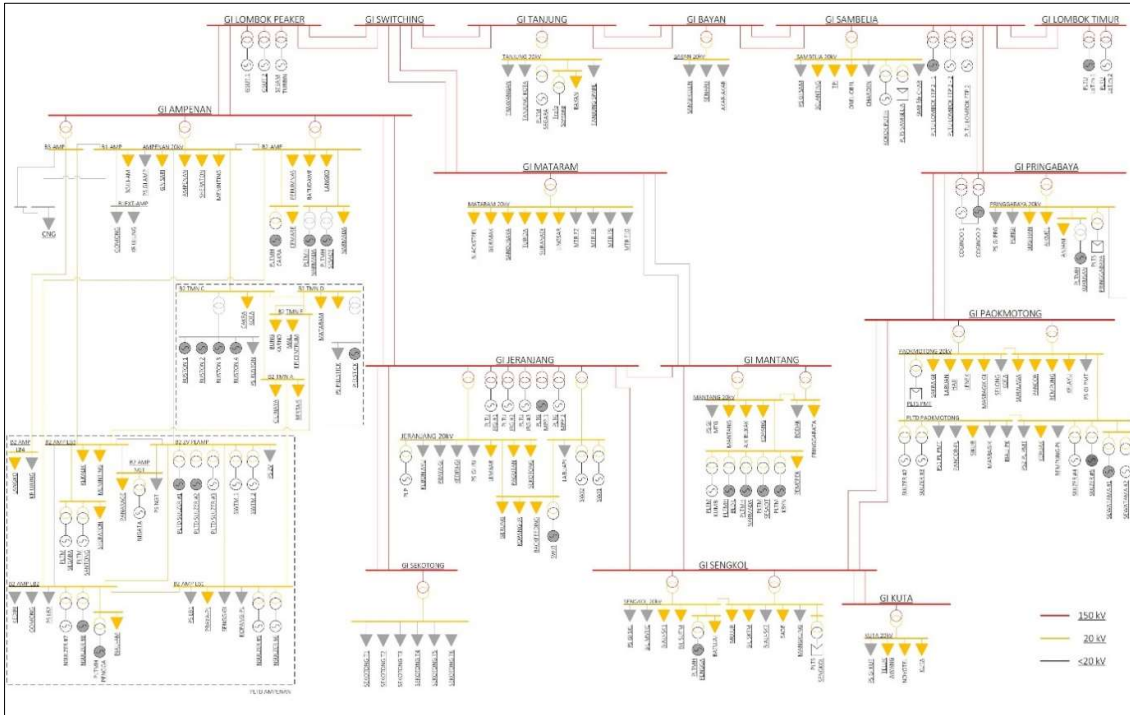


Gambar 3. Standar Frekuensi Pembatasan Operasi Sebagian atau Beban Penuh pada Turbin Saat Frekuensi *Abnormal* (IEEE C37.106-2003, 2004)

Continuous operation merupakan daerah frekuensi normal. *Restricted time operating frequency limits* merupakan daerah frekuensi yang masih diijinkan namun hanya bersifat sementara (tergantung besar frekuensi dan waktu). Semakin besar turun frekuensinya maka semakin pendek waktu yang diijinkan frekuensi pada kondisi tersebut. *Prohibited operation* merupakan daerah frekuensi terlarang, sehingga frekuensi tidak diijinkan mencapai daerah tersebut.

2.3 Pemodelan Sistem Kelistrikan Lombok

Pada tahap ini, berdasarkan data tentang sistem kelistrikan Lombok 2023 seperti pada Gambar 4 yang telah didapatkan dari tahap studi literatur, maka *single-line* diagram sistem kelistrikan Lombok dimodelkan dengan bantuan perangkat lunak simulasi DigSILENT. Pemodelan sistem ini termasuk masuknya 3 unit PLTU Lombok Timur sebesar 150 MW yang mulai beroperasi pada tahun 2023. Selain itu pada pemodelan sistem dilakukan inventarisasi 42 pembangkit lainnya, 115 beban, dan 17 x 2 saluran transmisi. Pengaturan *droop* dan *deadband* untuk pembangkit *load follower* pada sistem kelistrikan Lombok dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 4. SLD Sistem Kelistrikan Lombok 2023

Tabel 2. Data Setting Droop dan Dead Band Pembangkit Primer

No	Pembangkit Load Follower	Demand (MW)	Droop (%)	Dead-band	Ramp Rate (MW/menit)	Keterangan
1.	PLTMGU Lombok Peaker 13-unit x 9,6 MW	124,8	0	10 mHz	1,8	Load Follower-1
2.	PLTG MPP Jeranjang 1-unit x 26 MW	26	4	20 mHz	6	Load Follower-2
3.	PLTU Jeranjang #1	22,5	5,5	-	0,1	Load Follower-3
4.	PLTU Jeranjang #2	22,5	5,5	-	0,1	
5.	PLTU Jeranjang #3	22,5	6	-	0,1	
6.	PLTU LED 2-unit x 25 MW	50	6	2 RPM	0,5	Turbin Follow Boiler
7.	PLTU Lombok Timur 3-unit x 50 MW	150	6	2 RPM	0,5	

2.4 Simulasi dan analisis Load Flow

Pada tahap ini dilakukan simulasi *load flow* untuk memvalidasi pemodelan sistem pada *software* berdasarkan profil tegangan tiap bus dan total daya pembangkitan, agar simulasi yang dilakukan sesuai dengan kondisi eksisting.

2.5 Skema *Load Shedding* dan Operasi *Islanding*

Pada tahap ini, berdasarkan data beban dari sistem kelistrikan Lombok yang telah didapatkan dari tahap studi literatur ditentukan dulu beban-beban yang tidak boleh dilepas karena merupakan beban-beban penting yang diprioritaskan mendapatkan suplai daya hingga operasi *islanding*. Beban yang dilepas pertama kali harus sekecil mungkin untuk meminimalisir terjadinya transien pada sistem. Pengaturan skema *load shedding* dan operasi *islanding* dapat dilihat pada Tabel 3. Pengaturan operasi *islanding* akan lebih difokuskan untuk menyuplai beban prioritas yang diilustrasikan seperti pada Gambar 5. Beban-beban prioritas pada sistem kelistrikan Lombok adalah kota Mataram yang merupakan ibu kota provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB), Bandar Udara Internasional Lombok, dan Kawasan Ekonomi Khusus (KEK) Kuta dan Mandalika.

Tabel 3. Data Skema *Load Shedding* dan Operasi *Islanding*

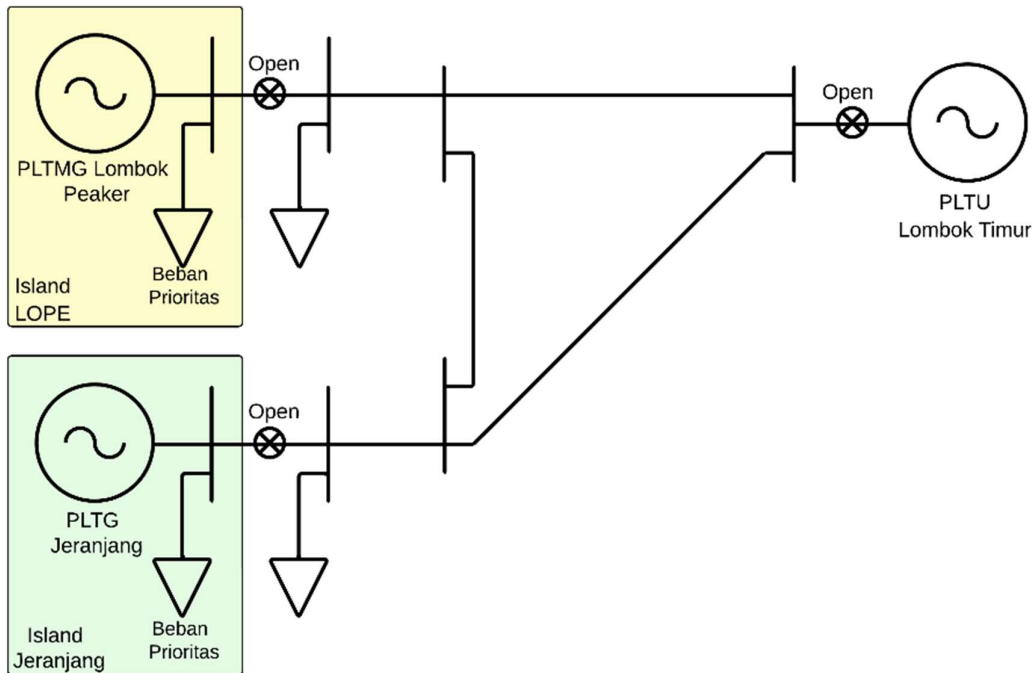
Pengaturan	Beban	LS (%)
Tahapan <i>Automatic Load Shedding</i>		
Tahap 1: <49,1 Hz	Gunungsari, Rempung-GI	7
Tahap 2: <49,0 Hz	Narmada, Aik Bukak, Pringgarata, Aikmel, Sugihan	7
Tahap 3: <48,9 Hz	Kopang-JR, Teluk Awang, Keruak, Kopang-GI, Pemepek	7
Tahap 4: <48,8 Hz	Ampenan, Pemepek, Sade	7
Tahap 5: <48,7 Hz	Meninting, Pagutan, Suralaga	5
Tahap 6: <48,6 Hz	Praya-PL, Cemare, Anjani, Mujur	5
Tahap 7: <48,5 Hz	Sekotong, Mantang, Batujai	5
Tahap 8: <48,4 Hz	Batudawe, Kelayu, Mataram-PL	5
Total ALS Tahap 1 s.d. 8 =		48
Operasi <i>Islanding</i>		
Tahap 9: <48,2 Hz	Interkonektor 2-GI	

2.6 Simulasi dan Analisis Kestabilan Transien Generator *Trip*

Pada tahap ini dilakukan perancangan skenario generator *trip* dengan menggunakan kombinasi beberapa generator sesuai dengan besaran total pembangkit lepas seminimal mungkin untuk mengetahui seberapa besar sistem kehilangan suplai daya agar *trigger* setiap tahapan tercapai. Generator yang dihilangkan harus merupakan generator sekunder, dan tidak membahas tentang kehilangan *swing* generator. Dalam hal ini PLTG MPP Jeranjang merupakan *swing* generator pada sistem kelistrikan Lombok. Generator akan dipilih sesuai *trigger* pada setiap tahapan *load shedding* dan *islanding* yang akan *trip* pada $t = 1$ detik dan durasi simulasi akan dilakukan selama 60 detik. Dari hasil setiap tahapan *load shedding* dan operasi *islanding* berdasarkan *trigger* generator *trip* yang telah disimulasikan akan ditinjau respon frekuensi sistem.

2.7 Operasi *Islanding Stiffness* Kondisi *Edge* Maksimum dan *Edge* Minimum

Gambaran umum dari operasi *islanding* dapat dilihat pada Gambar 5. Area *islanding* dibagi menjadi dua bagian, yaitu area pertama yang disebut sebagai *Island* LOPE yang dilengkapi dengan PLTMGU Lombok Peaker, yang akan menyuplai ibu kota Mataram dan sekitarnya. Area kedua yang disebut sebagai *Island* Jeranjang yang memiliki PLTG MPP dan PLTU Jeranjang akan menyuplai Bandar Udara Internasional Lombok, KEK Kuta dan Mandalika, serta area sekitarnya. Penentuan cakupan *island* ini dengan memperhitungkan komposisi pembangkit. Pembangkit *fast response* menjadi tulang punggung utama dalam pembentukan *island*. Dalam konteks ini, PLTMGU Lombok Peaker dan PLTG MPP yang menjadi peran kunci. Pembentukan *island* dengan menggunakan pembangkit utama berupa PLTU tidak memungkinkan karena *ramp rate* pembangkit yang rendah, sehingga tidak dapat menanggapi perubahan daya dengan cepat.



Gambar 5. Gambaran Umum Operasi *Islanding* Sistem Kelistrikan Lombok

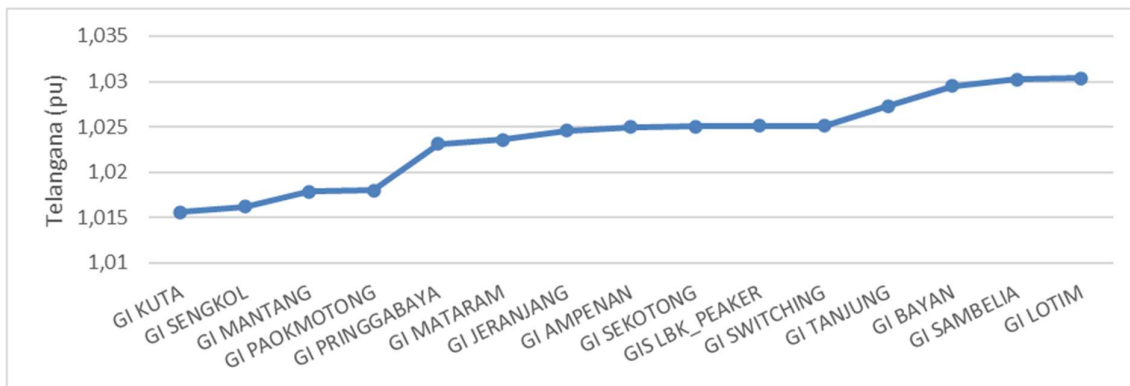
Pada tahap ini, dilakukan simulasi kestabilan transien dengan memanfaatkan *trigger* generator *trip* yang berbeda dari simulasi operasi *islanding* kondisi eksisting. *Trigger* generator *trip* pada simulasi ini diimplementasikan dengan melepaskan pembangkit yang berlokasi di area Lombok Timur, yakni 3 unit PLTU Lombok Timur dan 2 unit PLTU LED, dengan tujuan menciptakan gangguan pada kondisi ekstrem dan mengevaluasi keberhasilan pembangkit *load follower* di setiap area *island*. Simulasi ini akan dilakukan dengan merubah pola operasi pembangkitan sesuai respon frekuensi operasi *islanding* pada kondisi eksisting untuk mendapatkan kondisi *edge* maksimum dan minimum. Kondisi *edge* maksimum adalah ketika respon frekuensi hampir mencapai batas atas *overfrequency*. Sebaliknya kondisi *edge* minimum adalah ketika respon frekuensi hampir mencapai batas bawah *underfrequency*. Durasi simulasi sama dengan sebelumnya, di mana generator yang dipilih akan *trip* pada $t = 1$ detik, dan simulasi berlangsung selama 60 detik. Hasil yang diperoleh bertujuan untuk menentukan batas aman operasional pada pembangkit *load follower*. Hal ini penting agar, jika sistem kelistrikan Lombok mengalami kehilangan pasokan hingga mencapai operasi *islanding*, pembangkit masih dapat beroperasi sesuai batasan aman yang direkomendasikan oleh standar IEEE C37.106™-2003.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Simulasi *Load Flow*

Simulasi *load flow* untuk kondisi eksisting sistem kelistrikan di Lombok dilakukan berdasarkan beban puncak pada tahun 2023. Total beban yang dimodelkan adalah sebesar 331,44 MW + 11,09 MVAR, dengan total daya pembangkitan sebesar 339,92 MW + 33,06 MVAR, dan total *losses* sebesar 8,47 MW + 21,97 MVAR. Profil tegangan pada bus 150 kV setiap Gardu Induk (GI) sistem kelistrikan Lombok dapat dilihat pada Gambar 6, yang menunjukkan hasil profil tegangan dalam rentan 1,01 pu hingga 1,03 pu. Dari hasil simulasi *load flow* berikut akan menjadi kondisi *initial* sebelum terjadinya gangguan generator *trip*.

Strategi Operasi *Load Shedding* dan *Islanding Stiffness* Sistem Tenaga Listrik pada Kondisi *Edge Emergency*



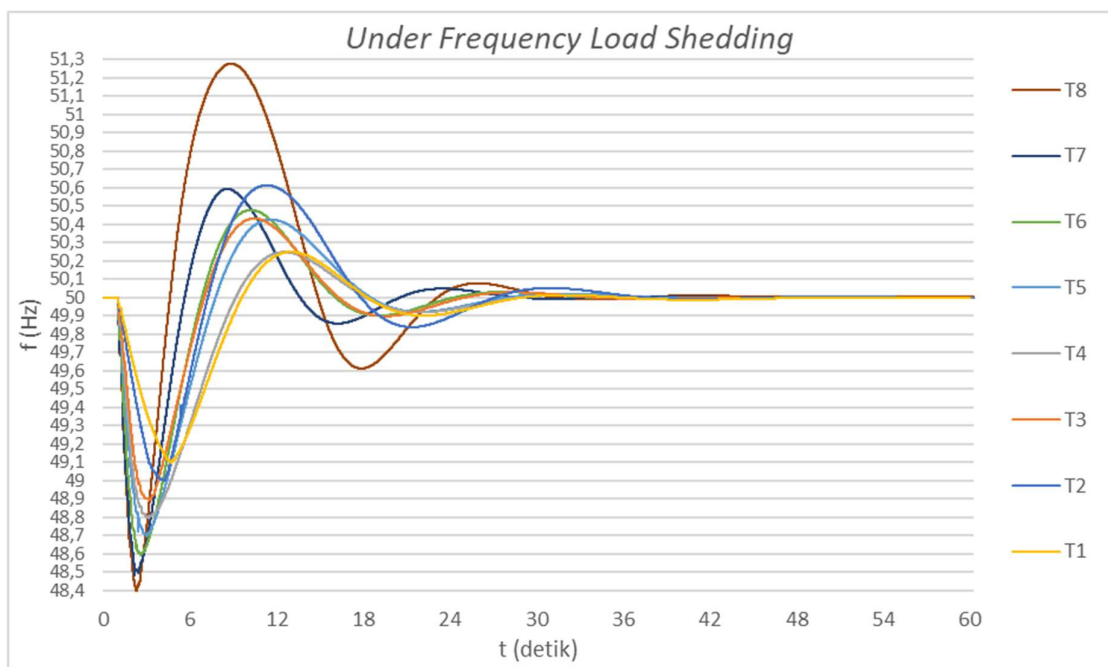
Gambar 6. Profil Tegangan pada Bus 150 kV Operasi Eksisting

3.2 *Load Shedding* dan *Islanding*

Hasil simulasi kestabilan transien generator *trip* dapat dilihat pada Tabel 4 untuk pencapaian setiap tahapan.

Tabel 4. *Trigger Generator Trip* Tahapan *Load shedding* dan Operasi *Islanding*

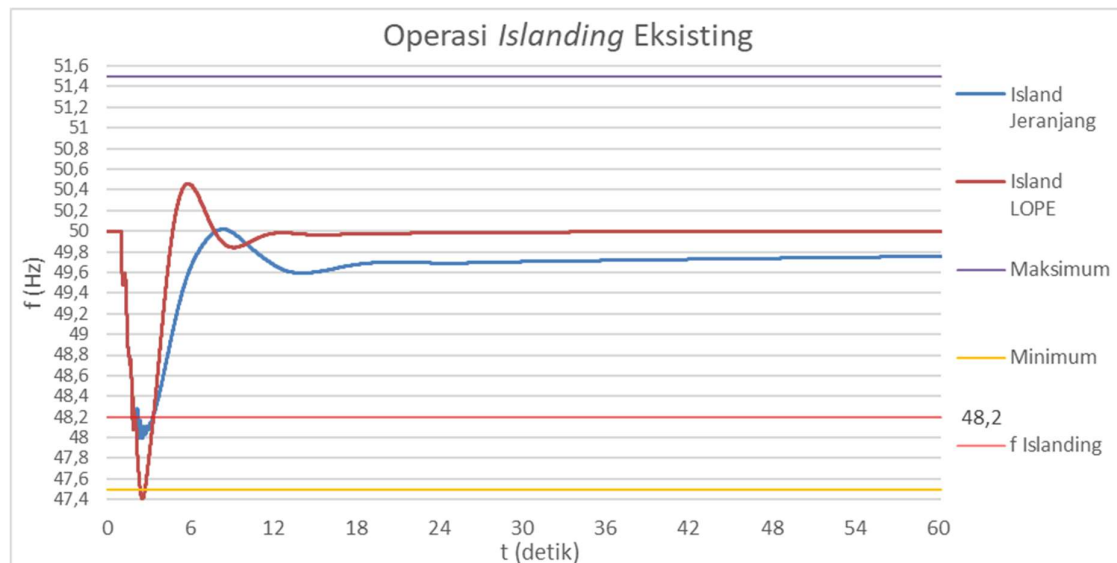
<i>Load Shedding</i>	<i>Trigger Generator Trip (MW)</i>	t (detik)	f (Hz)	<i>Total Beban Lepas</i>	
				MW	%
Tahap 1: <49,1 Hz	27,01	4,699	49,0973	14,11	4%
Tahap 2: <49,0 Hz	36,04	4,223	48,9996	37,30	11%
Tahap 3: <48,9 Hz	56,20	3,183	48,8926	59,76	18%
Tahap 4: <48,8 Hz	67,76	2,903	48,7974	71,08	21%
Tahap 5: <48,7 Hz	76,59	2,888	48,6971	88,96	27%
Tahap 6: <48,6 Hz	92,76	2,423	48,5927	111,73	34%
Tahap 7: <48,5 Hz	108,24	2,219	48,4953	129,48	39%
Tahap 8: <48,4 Hz	119,57	2,081	48,3984	145,21	44%
<i>Islanding</i> : <48,2 Hz	175,00	1,994	48,1687	-	-



Gambar 7. Respon Frekuensi UFLS Tahap 1 sampai dengan Tahap 8

Respon frekuensi tahap pertama sampai dengan delapan dapat dilihat pada Gambar 7. Tahap pertama, *trigger* pembangkit dilepas sebesar 27,01 MW, menyebabkan penurunan frekuensi sistem hingga mencapai 49,0973 Hz pada detik 4,699, dengan pemulihan frekuensi normal sekitar detik 20 dan total beban yang dilepas mencapai 14,11 MW. Tahap kedua, *trigger* pembangkit dilepas sebesar 36,04 MW, mengakibatkan penurunan frekuensi hingga mencapai 48,9996 Hz pada detik 4,223, dengan pemulihan frekuensi normal sekitar detik 20 dan total beban yang dilepas mencapai 37,3 MW. Tahap ketiga, *trigger* pembangkit dilepas sebesar 56,2 MW, menyebabkan penurunan frekuensi hingga mencapai 48,8926 Hz pada detik 3,183, dengan pemulihan frekuensi normal sekitar detik 20 dan total beban yang dilepas mencapai 59,76 MW. Tahap keempat, *trigger* pembangkit dilepas sebesar 67,76 MW, mengakibatkan penurunan frekuensi hingga mencapai 48,7974 Hz pada detik 2,903, dengan pemulihan frekuensi normal sekitar detik 20 dan total beban yang dilepas mencapai 71,08 MW.

Respon frekuensi tahap kelima, *trigger* pembangkit dilepas sebesar 76,59 MW, menyebabkan penurunan frekuensi sistem hingga mencapai 48,6971 Hz pada detik 2,888, dengan pemulihan frekuensi normal sekitar detik 20 dan total beban yang dilepas mencapai 88,96 MW. Tahap keenam, *trigger* pembangkit dilepas sebesar 92,76 MW, mengakibatkan penurunan frekuensi hingga mencapai 48,5927 Hz pada detik 2,423, dengan pemulihan frekuensi normal sekitar detik 20 dan total beban yang dilepas mencapai 111,73 MW. Tahap ketujuh, *trigger* pembangkit dilepas sebesar 108,24 MW, menyebabkan penurunan frekuensi hingga mencapai 48,4953 Hz pada detik 2,219, dengan pemulihan frekuensi normal sekitar detik 20 dan total beban yang dilepas mencapai 129,48 MW. Tahap kedelapan, *trigger* pembangkit dilepas sebesar 119,57 MW, mengakibatkan penurunan frekuensi hingga mencapai 48,3984 Hz pada detik 2,081, dengan pemulihan frekuensi normal sekitar detik 20 dan total beban yang dilepas mencapai 145,21 MW.



Gambar 8. Respon Frekuensi Operasi *Islanding* Kondisi Eksisting

Respon frekuensi pada tahap operasi *islanding*, yang tergambar pada Gambar 8, dilakukan dengan melepaskan pembangkit sebesar 175 MW. Frekuensi *trigger* operasi *islanding* tercapai pada detik 1,994, dan sistem mengalami penurunan hingga mencapai 47,4058 Hz pada detik 2,301. Penurunan frekuensi berlanjut karena PLTMGU Lombok Peaker tidak mampu merespons fluktuasi beban dengan cepat selama operasi *islanding*. Oleh karena itu, diperlukan rekomendasi terkait pola operasi pembangkitan agar pembangkit dapat beroperasi secara optimal sesuai dengan batasan aman yang disarankan oleh standar IEEE C37.106™-2003.

3.3 *Islanding Stiffness*

Untuk mendapatkan pola operasi pembangkitan yang optimal pada simulasi *islanding stiffness*, dilakukan *trigger* generator *trip* seluruh pembangkit di area Lombok Timur. Langkah ini diambil untuk menciptakan kondisi terekstrem di mana sistem kehilangan pasokan dari pembangkit-pembangkit besar, sehingga menyebabkan penurunan frekuensi sistem hingga <48,2 Hz. Respons frekuensi dibatasi dengan *overfrequency* maksimal sebelum mencapai 51,5 Hz dan *underfrequency* maksimal sebelum mencapai 47,5 Hz, dengan batasan ini ditetapkan untuk mencegah kerusakan pada pembangkit. Rekomendasi operasi pembangkitan telah terdokumentasi dalam Tabel 5. Perbedaan signifikan terlihat pada jumlah PLTMGU Lombok Peaker yang beroperasi dan cadangan daya yang tersedia.

Tabel 5. Rekomendasi Persebaran Operasi Pembangkit

Kondisi		Pembangkitan	
Eksisting		Initial (MW)	RMS (MW)
<i>Island</i> LOPE	10 unit PLTMGU LOPE	62,10	79,64
<i>Island</i> Jeranjang	1 unit PLTG MPP dan 3 unit PLTU JRG	75,09	80,21
Lombok Timur	3 unit PLTU LOTIM dan 2 unit PLTU LED	200,00	9,12
Edge Masimum		Initial (MW)	RMS (MW)
<i>Island</i> LOPE	13 unit PLTMGU LOPE	91,80	83,15
<i>Island</i> Jeranjang	1 unit PLTG MPP dan 3 unit PLTU JRG	74,96	80,05
Lombok Timur	3 unit PLTU LOTIM dan 2 unit PLTU LED	169,50	0
Edge Minimum		Initial (MW)	RMS (MW)
<i>Island</i> LOPE	11 unit x 9,6 MW PLTMGU LOPE	66,10	83,41
<i>Island</i> Jeranjang	1 unit PLTG MPP dan 3 unit PLTU JRG	79,77	80,16
Lombok Timur	3 unit PLTU LOTIM dan 2 unit PLTU LED	191,00	0

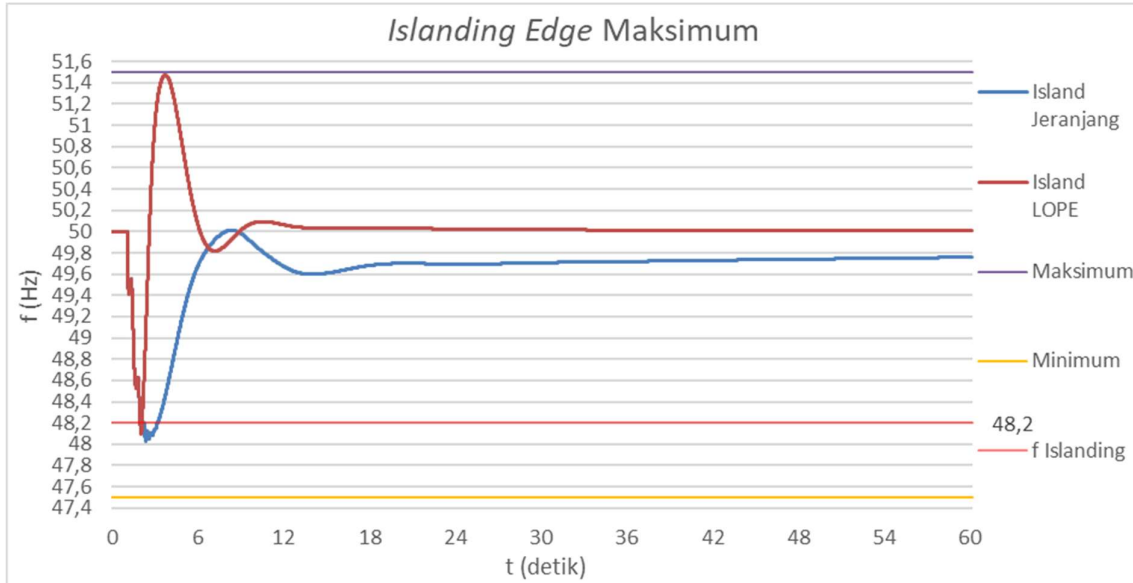
Berdasarkan Tabel 5 dan Tabel 6 dalam kondisi eksisting hanya 10 unit PLTMGU Lombok Peaker yang dioperasikan yang memiliki total cadangan daya sebesar 33,9 MW. Hasil simulasi kondisi eksisting pada operasi *islanding* menyebabkan respons frekuensi turun hingga melebihi batasan *underfrequency* yang telah ditetapkan yaitu mencapai 47,4058 Hz, dengan total daya yang terbangkitkan setelah gangguan hanya mencapai 79,64 MW pada area *Island* LOPE.

Tabel 6. Respon Frekuensi Operasi *Islanding*

Kondisi	t (detik)	f minimum (Hz)	t (detik)	f maksimum (Hz)
Eksisting	2,301	47,406	5,601	50,460
<i>Edge</i> Maksimum	2,178	48,032	3,546	51,473
<i>Edge</i> Minimum	1,699	47,517	5,212	50,416

Operasi *Islanding Edge* Maksimum

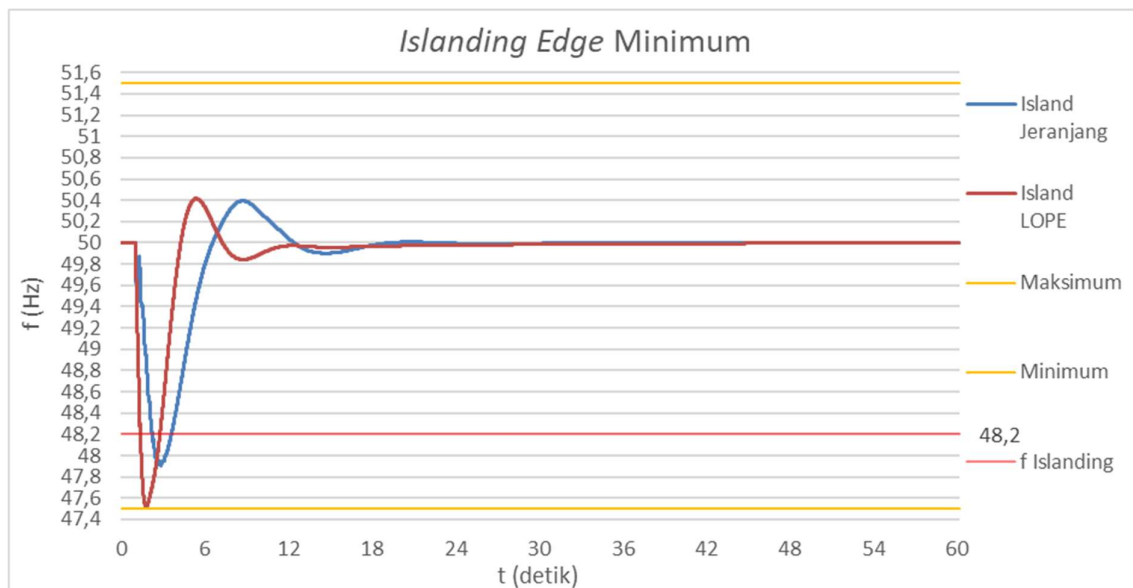
Operasi pada kondisi *edge* maksimum dilakukan dengan tujuan mencapai operasi optimal, di mana respon frekuensi naik semaksimal mungkin sebelum mencapai batas atas 51,5 Hz. Berdasarkan hasil simulasi yang terdokumentasi pada Tabel 5, Tabel 6, dan Gambar 9, kondisi *edge* maksimum tercapai dengan mengoperasikan 13 unit PLTMGU Lombok Peaker. Pada awal operasi, total daya yang terbangkitkan mencapai 91,8 MW, dengan cadangan daya sebesar 33 MW. Respon frekuensi menunjukkan bahwa frekuensi terendah pada *Island* LOPE mencapai 48,032 Hz pada detik 2,178, sementara frekuensi tertinggi mencapai 51,473 Hz pada detik 3,546. Penting untuk dicatat bahwa seluruh rentang frekuensi tersebut masih berada dalam batas yang telah ditetapkan sebelumnya. Simulasi ini berakhir dengan dengan frekuensi yang kembali stabil pada operasi normal pada kisaran detik 12 dan total daya yang terbangkitkan setelah gangguan mencapai 83,15 MW pada area *Island* LOPE.



Gambar 9. Respon Frekuensi Operasi *Islanding* Kondisi *Edge* Maksimum

Operasi *Islanding Edge* Minimum

Operasi pada kondisi *edge* minimum dilakukan dengan tujuan mencapai operasi optimal, di mana respon frekuensi turun semaksimal mungkin sebelum mencapai batas bawah 47,5 Hz. Berdasarkan hasil simulasi yang terdokumentasi pada Tabel 5, Tabel 6, dan Gambar 10, kondisi *edge* minimum tercapai dengan mengoperasikan 11 unit PLTMGU Lombok Peaker. Pada awal operasi, total daya yang terbangkitkan mencapai 66,1 MW, dengan cadangan daya sebesar 39,5 MW. Respon frekuensi menunjukkan bahwa frekuensi terendah pada *Island* LOPE mencapai 47,517 Hz pada detik 1,699, sementara frekuensi tertinggi mencapai 50,416 Hz pada detik 5,212. Hasil respon frekuensi tersebut masih berada dalam batas yang telah ditetapkan sebelumnya. Simulasi ini berakhir dengan dengan frekuensi yang kembali stabil pada operasi normal pada kisaran detik 12 dan total daya yang terbangkitkan setelah gangguan mencapai 83,41 MW pada area *Island* LOPE.



Gambar 10. Respon Frekuensi Operasi *Islanding* Kondisi *Edge* Minimum

4. KESIMPULAN

Dua kesimpulan dapat diambil dari hasil penelitian ini. Pertama, operasi pada setiap tahap *load shedding* yang direkomendasikan berhasil mempertahankan kestabilan frekuensi, dengan rata-rata frekuensi kembali normal pada detik ke-20. Kedua, operasi *islanding stiffness* kondisi *edge emergency* berhasil dilakukan dengan mempertahankan respon frekuensi pada kondisi *edge maksimum* dengan batasan frekuensi di bawah 51,5 Hz, di mana frekuensi tertinggi ini terjadi pada *island* LOPE yaitu 51,473 Hz. Kondisi *edge maksimum* dapat tercapai dengan maksimal total operasi daya aktif pada PLTMGU LOPE sebesar 91,8 MW. Sedangkan pada kondisi *edge minimum* dengan batasan frekuensi di atas 47,5 Hz, di mana frekuensi terendah ini terjadi pada *island* LOPE yaitu 47,517 Hz. Kondisi *edge minimum* dapat tercapai dengan minimal total operasi daya aktif pada PLTMGU LOPE sebesar 66,1 MW. Frekuensi seluruh operasi *islanding* dapat pulih kembali ke nilai normal dalam rentang waktu detik ke-12.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kelompok Kajian *Power System Engineering and Energy Management Research Group* (PseeMRG), Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Indonesia, yang telah memberikan pendanaan publikasi ini.

DAFTAR RUJUKAN

- Abbas, A., Doud, K. R., Sayed, E., & Ahmed, A. (2021). Power System Transient Stability Case Study: A Power Sub-Station Plant in Sudan. *World Scientific News*, 158(2021), 267 - 284.
- Abo-Khalil, A. G., Abdalla, M., Bansal, R. C., & Mbungu, N. T. (2023). A critical assessment of islanding detection methods of solar photovoltaic systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, 52, 103681.
- Al Hosani, M., Qu, Z., & Zeineldin, H. H. (2015). A Transient Stiffness Measure for Islanding Detection of Multi-DG Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(2), 986 - 995.
- Al Kez, D., Foley, A. M., Ahmed, F., & Morrow, D. J. (2023). Overview of frequency control techniques in power systems with high inverter-based resources: Challenges and mitigation measures. *IET Smart Grid*, 6(5), 447 - 469.
- Alvarez-Alvarado, M. S., Donaldson, D. L., Recalde, A. A., Noriega, H. H., Khan, Z. A., Velasquez, W., & Rodriguez-Gallegos, C. D. (2022). Power System Reliability and Maintenance Evolution: A Critical Review and Future Perspectives. *IEEE Access*, 10, 51922 - 51950.
- Baškarad, T., Holjevac, N., & Kuzle, I. (2024). A new perspective on frequency control in conventional and future interconnected power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 156(November 2023), 109731.
- Chaturika, D. A. H., Perumpularachchi, L. Y., Abeyratne, S. G., & Wijekoon, R. B. (2020). Managing Spinning Reserves for Power System Stability under Increased Renewable

- Energy Penetration. *2020 IEEE 15th International Conference on Industrial and Information Systems, ICIIS 2020 - Proceedings, November 2020*, (pp. 127 - 132).
- Energi, M., & Sumber Daya, M. (2020). Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik (Grid Code). In *Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia* (Issue 3). Jakarta: ESDM.
- IEEE C37.106-2003. (2004). IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants. (*Revision of ANSI/IEEE C37.106-1987*), 15(1), 1 - 40.
- Islam, M. M., Nagrial, M., Rizk, J., & Hellany, A. (2021). General aspects, islanding detection, and energy management in microgrids: A review. *Sustainability (Switzerland)*, 13(16).
- Lackovic, V. (2017). *Power System Transient Stability Study Fundamentals* (Issues E03-024). New Jersey: Continuing Education and Development, Inc.
- Sauhats, A., Utans, A., Silinevics, J., Junghans, G., & Guzs, D. (2021). Enhancing power system frequency with a novel load shedding method including monitoring of synchronous condensers' power injections. *Energies*, 14(5).
- Shazon, M. N. H., Nahid-Al-Masood, & Jawad, A. (2022). Frequency control challenges and potential countermeasures in future low-inertia power systems: A review. *Energy Reports*, 8, 6191 - 6219.
- Shrestha, A., & Gonzalez-Longatt, F. (2021). Frequency stability issues and research opportunities in converter dominated power system. *Energies*, 14(14).
- Tür, M. R., Ay, S., Erduman, A., Shobole, A., & Wadi, M. (2017). Impact of demand side management on spinning reserve requirements designation. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7(2), 946 - 953.