Analisis Efektivitas Over Generation Shedding PLTA Merangin terhadap Pembebanan Interbus Transformer Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi Bangko

Ija Darmana[1*], Erliwati[2], Yusril Amin[3]
[1]Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta, Indonesia
[2]Teknik Elektromedik, Politeknik Kesehatan Siteba, Indonesia
[3]Alumni Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Bung Hatta, Indonesia

Corresponding Author's e-mail : *ija.darmana@bunghatta.ac.id*

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada

Vol. 04, No. 10 Oktober, 2026

Page: 6504-6515

DOI:

https://doi.org/10.55681/armada.v4i10.4365

Article History:

Received: Agustus 12, 2026

Revised: September 27, 2026

Accepted: Oktober 19, 2026

Abstract *: The increasing generation of Merangin Hydroelectric Power Plant has the potential to cause overloading of the 275/150 kV Interbus Transformer (IBT) at Bangko Extra High Voltage Substation, particularly under N-1 contingency conditions. This condition requires mitigation to maintain the reliability and security of the Sumatra interconnected power system. This study aims to analyze the effect of Merangin power generation on IBT loading and evaluate the effectiveness of Over Generation Shedding (OGS) in mitigating transformer overload. The research method involved power system modeling and simulation using DIgSILENT PowerFactory. Simulations were conducted under normal operating conditions, N-1 contingency conditions, and stepwise OGS implementation. The evaluation parameters included IBT loading, power flow, voltage, current, and system frequency response. The simulation results showed that IBT loading reached 114.1% under N-1 contingency conditions. The first OGS stage, involving the shedding of one generator unit with a capacity of 87.5 MW, reduced the loading to 81.3%, while the second stage, involving the shedding of two units totaling 175 MW, reduced the loading to 45.3%. These results indicate that OGS is effective in reducing IBT loading and supporting compliance with the N-1 reliability criterion.*

Keywords : *Over Generation Shedding, Merangin Hydroelectric Power Plant, Interbus Transformer, N-1 contingency, DIgSILENT PowerFactory.*

Abstrak : Peningkatan pembangkitan PLTA Merangin berpotensi menyebabkan pembebanan berlebih pada Interbus Transformer (IBT) 275/150 kV GITET Bangko, khususnya saat terjadi kontingensi N-1. Kondisi ini perlu ditangani untuk menjaga keandalan dan keamanan operasi sistem interkoneksi Sumatera. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pembangkitan PLTA Merangin terhadap pembebanan IBT serta mengevaluasi efektivitas penerapan Over Generation Shedding (OGS) dalam mengatasi kondisi overload. Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan dan simulasi sistem tenaga listrik menggunakan DIgSILENT PowerFactory. Simulasi meliputi kondisi operasi normal, kontingensi N-1, dan penerapan OGS secara bertahap dengan parameter evaluasi berupa pembebanan IBT, aliran daya, tegangan, arus, dan respons frekuensi sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi N-1, pembebanan IBT mencapai 114,1%. Penerapan OGS tahap pertama dengan

pelepasan satu unit generator sebesar 87,5 MW menurunkan pembebanan menjadi 81,3%, sedangkan tahap kedua dengan pelepasan dua unit sebesar 175 MW menurunkannya menjadi 45,3%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa OGS efektif mengurangi pembebanan IBT dan mendukung pemenuhan kriteria keandalan N-1.

Kata Kunci : Over Generation Shedding, PLTA Merangin, Interbus Transformer, Kontingensi N-1, DIgSILENT PowerFactory.

PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik harus beroperasi secara andal dan stabil dengan menjaga keseimbangan antara pembangkitan, beban, dan kemampuan jaringan transmisi (Duncan, 2012). Keandalan sistem menjadi aspek penting dalam menjamin kontinuitas penyaluran tenaga listrik, terutama ketika jaringan menghadapi gangguan atau perubahan konfigurasi akibat pelepasan elemen sistem. Dalam sistem interkoneksi Sumatera, khususnya jaringan 150 kV yang terhubung dengan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) Merangin dan Gardu Induk Tegangan Ekstra Tinggi (GITET) Bangko, pembangkitan PLTA Merangin yang mencapai 350 MW berpotensi meningkatkan aliran daya dan pembebanan Interbus Transformer (IBT) 275/150 kV. Kondisi tersebut menjadi semakin kritis ketika salah satu IBT mengalami gangguan atau terjadi kontingensi N-1, yaitu kondisi ketika satu elemen sistem mengalami pelepasan dari operasi (Elgallai, 2024). Apabila satu IBT tidak beroperasi, aliran daya yang sebelumnya dilayani oleh kedua IBT akan mengalami redistribusi ke IBT yang masih beroperasi. Perubahan ini dapat menyebabkan pembebanan transformator melampaui kapasitas nominal, memicu bekerjanya sistem proteksi, dan mengganggu kontinuitas penyaluran tenaga listrik (Ardiansyah, 2024).

Salah satu pendekatan yang dapat digunakan untuk mengatasi permasalahan pembebanan berlebih akibat tingginya pembangkitan adalah Over Generation Shedding (OGS). Metode ini dilakukan dengan melepaskan sebagian unit pembangkit secara terkontrol untuk mengurangi surplus pembangkitan dan mengendalikan aliran daya pada jaringan (Ma & Zondra, 2026). Penerapan OGS perlu dievaluasi berdasarkan tingkat penurunan pembebanan transformator dan kondisi operasi sistem setelah pelepasan pembangkitan. Selain itu, evaluasi keandalan sistem tidak cukup dilakukan hanya pada kondisi kontingensi N-1, tetapi juga perlu mempertimbangkan kondisi yang lebih ekstrem, yaitu kontingensi N-2, ketika kedua IBT 275/150 kV di GITET Bangko mengalami pelepasan secara bersamaan (Le, 2019). Evaluasi kontingensi merupakan bagian penting dalam analisis keandalan sistem tenaga listrik untuk memahami dampak gangguan terhadap kemampuan jaringan mempertahankan kondisi operasi yang aman (Bergen & Vittal, 2000). Kehilangan kedua IBT dapat mengubah konfigurasi jaringan dan keseimbangan daya sehingga berpotensi memengaruhi respons frekuensi sistem (Hanson, 2012). Oleh karena itu, efektivitas OGS perlu ditinjau tidak hanya dari kemampuannya mengurangi pembebanan transformator, tetapi juga dari respons frekuensi sistem setelah terjadi gangguan.

Permasalahan tersebut menunjukkan perlunya analisis yang mengintegrasikan evaluasi pembebanan transformator dan respons frekuensi dalam menilai efektivitas skema pelepasan pembangkitan. Pada kondisi kontingensi N-1, penerapan OGS perlu dikaji untuk mengetahui kemampuannya menurunkan pembebanan IBT yang masih beroperasi. Sementara itu, pada kondisi kontingensi N-2, analisis perlu diarahkan pada perubahan frekuensi sistem setelah kehilangan kedua IBT serta pentingnya koordinasi antara pelepasan pembangkitan dan pengaturan frekuensi generator dalam mempertahankan kondisi operasi sistem tenaga listrik (Kundur, P., Paserba, 2004; Darmana, 2024). Simulasi menggunakan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory dapat digunakan untuk memodelkan kondisi operasi tersebut dan mengevaluasi perubahan parameter sistem akibat gangguan maupun penerapan skema OGS (Marulitua et al., 2026). Parameter yang

diamati meliputi pembebanan transformator, arus transformator, daya aktif, dan frekuensi sistem setelah pelepasan pembangkitan secara bertahap (Abbas et al., 2016).

Meskipun OGS telah diidentifikasi sebagai salah satu pendekatan untuk mengendalikan pembangkitan berlebih, kajian yang berfokus pada sistem PLTA Merangin dan IBT 275/150 kV di GITET Bangko perlu secara khusus mempertimbangkan keterkaitan antara efektivitas pengurangan pembebanan pada kontingensi N-1 dan respons frekuensi pada kondisi kehilangan kedua IBT atau kontingensi N-2. Berdasarkan fokus tersebut, kesenjangan penelitian yang hendak dikaji terletak pada perlunya evaluasi terpadu terhadap kedua kondisi kontingensi tersebut dalam satu kerangka simulasi. Kebaruan penelitian ini diarahkan pada evaluasi penerapan OGS secara bertahap untuk mengurangi pembebanan IBT pada kondisi N-1, disertai analisis respons frekuensi sistem pada kondisi N-2. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan menganalisis efektivitas penerapan OGS pada PLTA Merangin dalam mengurangi pembebanan IBT 275/150 kV di GITET Bangko pada kondisi kontingensi N-1 serta mengevaluasi respons frekuensi sistem ketika kedua IBT mengalami pelepasan secara bersamaan (Hanson, 2012; Pardede, 2024). Analisis dilakukan melalui simulasi DIgSILENT PowerFactory dengan memperhatikan perubahan pembebanan transformator, arus transformator, daya aktif, dan frekuensi sistem setelah penerapan skema pelepasan pembangkitan secara bertahap (Marulitua et al., 2026; Abbas et al., 2016). Penelitian ini penting untuk memberikan dasar teknis dalam mengevaluasi efektivitas skema OGS dan mendukung pengambilan keputusan terkait pengamanan operasi sistem tenaga listrik pada kondisi kontingensi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode simulasi sistem tenaga listrik dengan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan pembangkitan PLTA Merangin terhadap pembebanan IBT 275/150 kV di GITET Bangko serta efektivitas Over Generation Shedding (OGS) dalam kondisi kontingensi (Otong et al., 2024). Analisis meliputi aliran daya dan simulasi dinamik dengan empat skenario, yaitu operasi normal saat kedua IBT beroperasi paralel (B.L. Theraja, 2005), kontingensi N-1 melalui pelepasan salah satu IBT (Marulitua et al., 2026), penerapan OGS secara bertahap untuk mengurangi pembebanan IBT (Ardiansyah, 2024), serta kontingensi N-2 melalui pelepasan kedua IBT secara bersamaan untuk mengevaluasi perubahan aliran daya, kemungkinan islanding, dan respons frekuensi sistem (El bouisfi et al., 2022). Pada skenario N-2, pengamatan mencakup daya aktif IBT, frekuensi pada sistem islanding Merangin dan sistem Sumatera, serta respons pengaturan frekuensi generator dalam mode Free Governor/FreqGov (Multi & Addaus, 2022).

Parameter evaluasi meliputi persentase pembebanan IBT terhadap kapasitas nominal, arus transformator dibandingkan dengan nilai pickup proteksi arus lebih (Tobar-Rosero et al., 2022), jumlah dan daya pembangkit yang dilepas, serta nilai maksimum, minimum, dan perubahan frekuensi selama simulasi untuk menilai efektivitas OGS dalam mengurangi overload dan respons sistem terhadap gangguan ekstrem (Abbas et al., 2016). Tahapan penelitian mencakup studi literatur, identifikasi dan pengumpulan data, pemodelan dan verifikasi sistem, simulasi berbagai kondisi operasi dan kontingensi, perancangan skenario OGS, analisis hasil, serta penarikan kesimpulan. Penelitian berfokus pada jaringan transmisi 150 kV sistem interkoneksi Sumatera Bagian Tengah yang menghubungkan PLTA Merangin dengan GITET Bangko, khususnya dua unit IBT 275/150 kV yang beroperasi paralel pada kondisi normal (Anshori et al., 2026). Simulasi DIgSILENT PowerFactory memungkinkan pengujian berbagai skenario tanpa mengganggu operasi sistem tenaga listrik aktual (Sulistiawati et al., 2024), sedangkan data teknis utama sistem yang digunakan dalam pemodelan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komponen Utama Sistem yang Dianalisis

No	Komponen	Simbol	Nilai	Satuan
1	Tegangan sisi primer	V_P	275	kV
2	Tegangan sisi skunder	V_S	150	kV

3	Jumlah Generator	N_G	4	Unit
4	Kapasitas seiap generaor	P_G	87,5	MW
5	Total kapasitas PLTA	P_T	350	MW
6	Jumlah IBT GITET Bangko	N_{IBT}	2	Unit
7	Kapasitas setiap IBT	P_{IBT}	250	MVA
8	Konfigurasi operasi IBT	C_{IBT}	-	Paralel
9	Perangkat lunak	DIg_{SILENT}	-	Power Factory

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Data pada Tabel 1 digunakan sebagai parameter awal pemodelan sistem sebelum simulasi dilakukan. Penelitian diawali dengan studi literatur dan identifikasi permasalahan, dilanjutkan dengan pengumpulan serta pemeriksaan data teknis pembangkit, transformator, jaringan transmisi, beban, dan parameter operasi. Data yang telah diverifikasi digunakan untuk membangun model PLTA Merangin, jaringan transmisi 150 kV, busbar GITET Bangko, dua unit IBT 275/150 kV, dan jaringan terkait pada DIgSILENT PowerFactory. Model mencakup parameter kapasitas daya, tegangan, faktor daya, reaktansi generator, kapasitas nominal, impedansi transformator, dan parameter saluran transmisi. Simulasi kondisi dasar dilakukan dengan mengoperasikan empat unit PLTA Merangin pada total pembangkitan 350 MW dan kedua IBT secara paralel. Hasilnya digunakan sebagai baseline untuk membandingkan daya aktif, daya reaktif, daya semu, pembebanan IBT, tegangan bus, arus saluran, aliran daya, dan rugi-rugi daya. Selanjutnya, simulasi kontingensi N-1 dilakukan dengan mengeluarkan IBT 1 atau IBT 2 dari operasi untuk mengetahui perubahan aliran daya dan potensi overload pada transformator yang tersisa (Anshari & Facta, 2015).

Berdasarkan kondisi kritis tersebut, skema Over Generation Shedding (OGS) dirancang melalui pelepasan satu atau beberapa unit generator PLTA Merangin secara bertahap hingga pembebanan IBT berada dalam batas operasi yang diizinkan. Skenario yang diuji meliputi kondisi tanpa OGS, pelepasan satu, dua, atau tiga unit generator, serta pengurangan pembangkitan sesuai kebutuhan dengan kondisi jaringan yang sama untuk memastikan bahwa perubahan hasil terutama disebabkan oleh perubahan pembangkitan (Indonesia & Nasional, 2011). Efektivitas OGS dievaluasi melalui perbandingan hasil simulasi kondisi normal, kontingensi N-1, dan setelah penerapan OGS, berdasarkan penurunan pembebanan IBT, pengurangan aliran daya, kestabilan tegangan, keseimbangan daya, pemenuhan kriteria keandalan N-1, serta minimalisasi pelepasan pembangkitan yang tidak diperlukan (Darmana et al., 2020). Penelitian ini tidak melibatkan responden manusia karena menggunakan simulasi sistem tenaga listrik; unit analisisnya adalah komponen dan kondisi operasi sistem yang dimodelkan pada DIgSILENT PowerFactory (Pardede, 2024). Objek dipilih secara purposive karena PLTA Merangin memiliki kapasitas maksimum 350 MW, sedangkan GITET Bangko memiliki dua IBT berkapasitas masing-masing 250 MVA yang menghubungkan sistem 150 kV dan 275 kV. Hubungan teknis tersebut menjadikan kedua komponen relevan untuk mengevaluasi pengaruh pembangkitan terhadap pembebanan transformator dan efektivitas OGS. Perangkat keras komputer digunakan untuk pemodelan, menjalankan simulasi, menyimpan hasil, dan mengolah data, sedangkan DIgSILENT PowerFactory digunakan untuk pemodelan serta analisis sistem tenaga listrik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika salah satu IBT 275/150 kV dikeluarkan dari sistem, seluruh aliran daya yang sebelumnya dibagi pada dua transformator akan dialihkan ke satu transformator yang masih beroperasi. Kondisi ini menyebabkan pembebanan transformator meningkat secara signifikan. Pada kondisi N-1, pembebanan IBT mencapai 114,1%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa transformator beroperasi di atas kapasitas nominalnya. Arus yang mengalir mencapai sekitar 1.100 A, lebih besar daripada nilai pickup proteksi arus lebih sebesar 1.058 A.

Apabila kondisi ini berlangsung cukup lama, transformator berpotensi mengalami pemanasan berlebih dan proteksi arus lebih dapat bekerja (Multi & Addaus, 2022).

Tabel 2. Pembebanan IBT pada Kondisi N-1

No	Parameter	Kondisi N-1	Satuan
1	Jumlah IBT beroperasi	1	Unit
2	Pembebanan transformator	114,1	%
3	Arus transformator	± 1.100	Amper
4	Pickup OCR	1.058	Amper
5	Status	Melebihi batas operasi	

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Tabel 2 memperlihatkan bahwa kontingensi N-1 dapat menyebabkan gangguan lanjutan apabila tidak diikuti tindakan pengamanan. Pembebanan di atas 100% juga menunjukkan bahwa keandalan sistem sangat dipengaruhi oleh ketersediaan kedua IBT di GITET Bangko. Pengaruh OGS tahap pertama dilakukan dengan melepaskan sebagian pembangkitan PLTA Merangin. Pelepasan pembangkitan tersebut mengurangi daya yang mengalir menuju jaringan 150 kV dan menurunkan beban pada IBT yang masih beroperasi. Setelah OGS tahap pertama diterapkan, pembebanan transformator turun dari 114,1% menjadi 79,85%. Arus transformator juga mengalami penurunan dari sekitar 1.100 A menjadi 765 A. Nilai tersebut sudah berada di bawah pickup OCR sebesar 1.058 A (Gatot & W, 2022).

Tabel 3. Hasil OGS Tahap Pertama

No	Parameter	Sebelum OGS	Setelah OGS tahap 1	Satuan
1	Pembebanan IBT	114,1	79,85	%
2	Arus transformator	±1.100	±765	Amper
3	Kondisi terhadap pickup OCR	Melebihi	Di bawah	-
4	Status operasi	Berisiko	Lebih aman	-

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Penurunan pembebanan tersebut menunjukkan bahwa OGS tahap pertama telah mampu mengatasi kondisi overload pada transformator. Selain mengurangi arus, OGS juga mengurangi kemungkinan kerja proteksi arus lebih akibat peningkatan aliran daya. Pada kondisi tertentu, OGS tahap pertama belum tentu menghasilkan margin operasi yang cukup besar. Oleh karena itu, disiapkan tahap kedua untuk mengurangi pembangkitan lebih lanjut apabila kondisi sistem masih membutuhkan pengurangan aliran daya. Setelah OGS tahap kedua diterapkan, pembebanan IBT berkurang menjadi 45,3%, sedangkan arus transformator turun menjadi sekitar 430 A. Nilai ini menunjukkan bahwa transformator memiliki margin operasi yang lebih baik dan risiko pemanasan berlebih dapat ditekan.

Tabel 4. Perbandingan Hasil Penerapan OGS

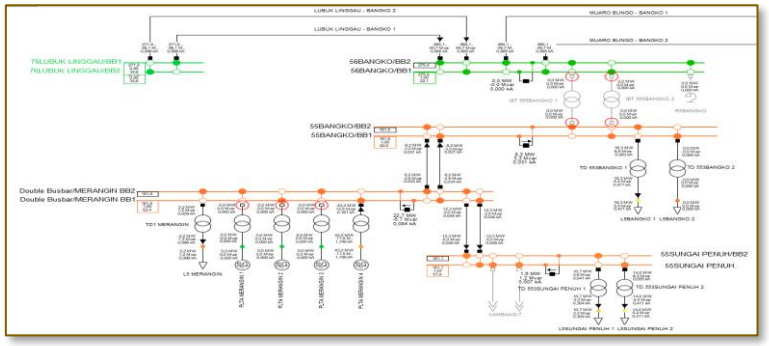
No	Kondisi	Pembebanan IBT (%)	Arus Transformator (Amper)
1	N-1 tanpa OGS	114,1	±1.100
2	N-1 dengan OGS tahap 1	79,85	±765
3	N-1 dengan OGS tahap 2	45,3	±430

Sumber: {Dokumen Pribadi}

Berdasarkan Tabel 4, OGS tahap kedua memberikan pengurangan pembebanan yang lebih besar dibandingkan tahap pertama. Akan tetapi, pelepasan pembangkitan harus tetap dikendalikan agar tidak menimbulkan ketidakseimbangan daya yang terlalu besar, penurunan frekuensi, atau berkurangnya pasokan energi ke sistem (Safaat & Samputra, 2025). Simulasi kondisi terburuk

dilakukan dengan mengeluarkan kedua IBT dari sistem. Kondisi tersebut menyebabkan kehilangan suplai sekitar 275,4 MW. Respons frekuensi sistem menunjukkan nilai maksimum sekitar 53,83 Hz dan nilai minimum sekitar 48,53 Hz. Untuk merespons gangguan tersebut, OGS melepaskan tiga unit pembangkit dengan total daya sekitar 262,5 MW. Satu unit pembangkit tetap dipertahankan dalam mode Free Governor/FreqGov agar dapat memberikan respons pengaturan frekuensi terhadap perubahan kondisi sistem. Hasil analisis gangguan dua IBT dan respons OGS menunjukkan pentingnya koordinasi antara pelepasan pembangkitan dan pengaturan frekuensi sistem.

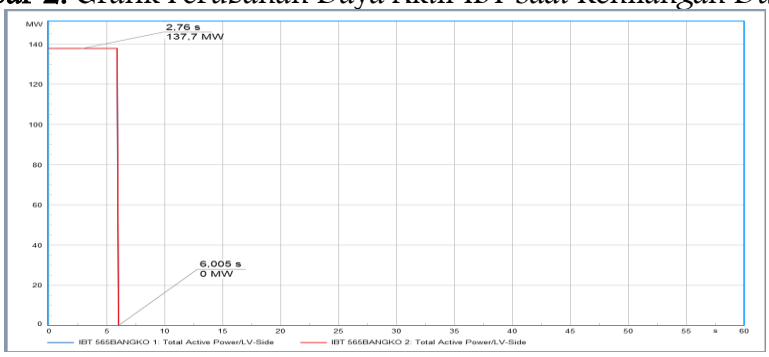
Gambar 1. Hasil Simulasi Kondisi Kehilangan Dua IBT



Sumber: {Dokumen Pribadi}

Walaupun kondisi kehilangan kedua IBT merupakan skenario yang sangat berat, hasil simulasi memperlihatkan bahwa OGS dapat mengurangi ketidakseimbangan antara pembangkitan dan penyaluran daya. Namun, skenario tersebut tetap memerlukan pengamanan tambahan karena kehilangan kedua transformator dapat menyebabkan pemisahan sistem, perubahan frekuensi yang besar, dan berkurangnya kemampuan penyaluran daya.

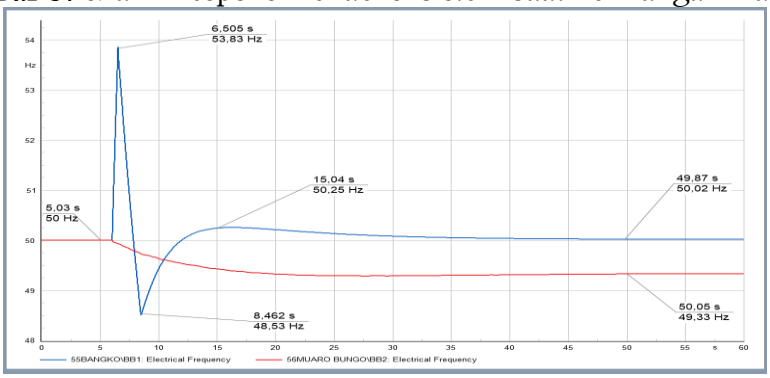
Gambar 2. Grafik Perubahan Daya Aktif IBT Saat Kehilangan Dua IBT



Sumber: {Dokumen Pribadi}

Berdasarkan Gambar 2. grafik sebelum gangguan masing-masing IBT menyalurkan daya aktif sekitar 137,7 MW. Gangguan terjadi pada sekitar 5,03 detik, kemudian daya aktif pada kedua IBT menurun hingga mencapai 0 MW pada sekitar 6,005 detik. Total daya aktif yang hilang akibat trip kedua IBT adalah: P_{hilang} = 137,7 + 137,7 dan P_{PLTA} = 275,4 MW. Respons frekuensi sistem akibat kehilangan dua IBT dan bekerjanya skema OGS ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 3. Grafik Respons Frekuensi Sistem Saat Kehilangan Dua IBT



Sumber: {Dokumen Pribadi}

Berdasarkan hasil simulasi, frekuensi sistem sebelum gangguan berada pada kondisi nominal sebesar 50 Hz. Gangguan terjadi pada sekitar 5,03 detik dan menyebabkan perubahan frekuensi pada kedua sistem. Pada bus 55BANGKO/BB1 (Sistem Islanding Merangin), frekuensi meningkat hingga sekitar 53,83 Hz pada 6,505 detik, kemudian turun hingga sekitar 48,53 Hz pada 8,462 detik. Frekuensi selanjutnya kembali meningkat hingga sekitar 50,25 Hz pada 15,04 detik dan berangsur menuju kondisi stabil sekitar 50,02 Hz. Sementara itu, pada bus 56 MUARO BUNGO/BB2 (Sistem Sumatera), frekuensi mengalami penurunan dan mencapai sekitar 49,33 Hz pada akhir simulasi. Perubahan frekuensi tersebut menunjukkan adanya osilasi akibat kehilangan kedua IBT dan pelepasan tiga unit generator oleh OGS. Satu unit generator yang tetap beroperasi dengan mode Free Governor (FreqGov) memberikan respons terhadap perubahan frekuensi sehingga frekuensi pada sistem islanding Merangin kembali mendekati nilai nominal. Dengan demikian, respons frekuensi menunjukkan bahwa sistem islanding Merangin masih dapat mencapai kondisi mendekati stabil setelah gangguan, meskipun mengalami deviasi frekuensi yang cukup besar pada awal kejadian.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan langsung antara pembangkitan PLTA Merangin, aliran daya menuju GITET Bangko, dan pembebanan IBT 275/150 kV. Ketika empat unit PLTA Merangin beroperasi dengan total pembangkitan 350 MW dan kedua IBT beroperasi secara paralel, aliran daya dapat terbagi pada kedua transformator. Namun, ketika salah satu IBT mengalami gangguan, seluruh aliran daya akan dialihkan ke IBT yang tersisa sehingga pembebanan meningkat dan mencapai kondisi overload. Penerapan OGS mampu mengurangi dampak tersebut melalui pengurangan pembangkitan PLTA Merangin. Pelepasan satu unit generator sebesar 87,5 MW telah menurunkan pembebanan IBT dari 114,1% menjadi 79,85%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa OGS Tahap 1 telah cukup untuk mengatasi overload pada skenario N-1. Pelepasan dua unit generator menurunkan pembebanan lebih lanjut menjadi 45,3%, tetapi membutuhkan pengurangan pembangkitan yang lebih besar. Dengan demikian, OGS dapat digunakan sebagai salah satu strategi pengendalian untuk mempertahankan kemampuan penyaluran sistem pada kondisi kontingensi. Penerapannya perlu dilakukan secara bertahap dengan mempertimbangkan pembebanan IBT, arus transformator, tegangan, frekuensi, serta kondisi proteksi. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa keberhasilan OGS tidak hanya ditentukan oleh besarnya penurunan pembebanan, tetapi juga oleh kemampuan sistem dalam mempertahankan keseimbangan daya dan kestabilan operasi setelah pelepasan unit pembangkit.

Pembahsan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontingensi N-1 pada IBT 275/150 kV di GITET Bangko menyebabkan pembebanan transformator meningkat hingga 114,1%, dengan arus sekitar 1.100 A, melampaui nilai pickup OCR sebesar 1.058 A. Kondisi ini terjadi karena aliran daya yang sebelumnya terbagi pada dua transformator dialihkan ke IBT yang masih beroperasi sehingga meningkatkan risiko overload dan bekerjanya proteksi arus lebih. Temuan ini sejalan dengan

penelitian Putri (2023) mengenai penerapan Over Load Shedding (OLS) pada IBT 150/70 kV Tasikmalaya serta Risqi dan Sunardiyo (2024), yang menunjukkan pentingnya tindakan korektif untuk mengatasi pembebanan berlebih akibat kontingensi transformator. Meskipun demikian, arus yang melampaui nilai pickup OCR tidak secara otomatis menyebabkan proteksi bekerja karena responsnya juga dipengaruhi oleh karakteristik waktu-arus dan durasi gangguan. Oleh karena itu, hasil simulasi menunjukkan adanya kondisi operasi berisiko yang memerlukan tindakan pengamanan lebih lanjut.

Penerapan Over Generation Shedding (OGS) menunjukkan efektivitas dalam mengurangi pembebanan transformator melalui pengurangan pembangkitan PLTA Merangin secara bertahap. Pada tahap pertama, pelepasan satu unit generator sebesar 87,5 MW menurunkan pembebanan IBT dari 114,1% menjadi 79,85%, sedangkan arus transformator berkurang dari sekitar 1.100 A menjadi 765 A. Pada tahap kedua, pelepasan dua unit generator dengan total daya 175 MW menurunkan pembebanan menjadi 45,3% dan arus menjadi sekitar 430 A. Hasil ini menunjukkan bahwa OGS mampu mengurangi aliran daya menuju IBT yang masih beroperasi dan mengembalikan pembebanan ke bawah kapasitas nominalnya. Temuan tersebut sejalan dengan Wang et al. (2022), yang menekankan pentingnya tindakan korektif berdasarkan tingkat risiko operasi transformator. Penelitian Risqi dan Sunardiyo (2024) juga menunjukkan bahwa skema pelepasan perlu disesuaikan dengan tingkat gangguan dan kebutuhan sistem. Dengan demikian, meskipun OGS tahap kedua menghasilkan margin pembebanan yang lebih besar, tahap pertama dapat menjadi pilihan awal yang lebih proporsional karena telah menurunkan pembebanan ke tingkat yang lebih aman. Pelepasan pembangkitan tambahan perlu mempertimbangkan kebutuhan pengamanan, keseimbangan daya, dan potensi berkurangnya pasokan energi.

Pada kondisi kontingensi N-2, pelepasan kedua IBT menyebabkan daya aktif yang semula disalurkan masing-masing sebesar 137,7 MW turun menjadi 0 MW, sehingga total daya aktif yang tidak lagi tersalurkan melalui kedua transformator mencapai 275,4 MW. Gangguan pada sekitar 5,03 detik diikuti perubahan frekuensi yang signifikan. Pada bus 55BANGKO/BB1 yang mewakili sistem islanding Merangin, frekuensi meningkat hingga 53,83 Hz, kemudian turun menjadi 48,53 Hz sebelum kembali mendekati 50 Hz pada akhir simulasi. Sementara itu, frekuensi pada bus 56 MUARO BUNGO/BB2 yang mewakili sistem Sumatera mencapai sekitar 49,33 Hz pada akhir simulasi. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa gangguan memengaruhi kedua bagian sistem secara berbeda dan bahwa pemulihan frekuensi pada satu bagian tidak selalu menunjukkan pemulihan seluruh sistem. Temuan ini sejalan dengan penelitian mengenai controlled islanding yang menekankan pentingnya keseimbangan daya dan pengendalian frekuensi pada setiap bagian jaringan yang terpisah (Frontiers in Energy Research, 2023). Sunjaq et al. (2024) juga menunjukkan pentingnya pengaturan frekuensi dalam mempertahankan kualitas operasi sistem tenaga listrik berbasis pembangkit hidro ketika terjadi transisi menuju kondisi islanding.

Dalam simulasi ini, tiga unit generator dilepas oleh skema OGS dengan total daya sekitar 262,5 MW, sementara satu unit generator tetap beroperasi dalam mode Free Governor/FreqGov untuk merespons perubahan frekuensi. Frekuensi sistem islanding Merangin yang kembali mendekati 50 Hz menunjukkan adanya respons pemulihan selama periode simulasi. Namun, deviasi awal yang mencapai 53,83 Hz dan 48,53 Hz mengindikasikan bahwa respons transien masih cukup besar sehingga belum dapat langsung disimpulkan bahwa sistem telah memenuhi seluruh kriteria kestabilan frekuensi. Penelitian Deltuva et al. (2023) menegaskan pentingnya evaluasi karakteristik sistem ketika terpisah dari jaringan interkoneksi, sedangkan kajian mengenai controlled islanding dalam International Journal of Electrical Power & Energy Systems (2021) menunjukkan perlunya mempertimbangkan kestabilan tegangan dan frekuensi setelah pemisahan jaringan. Sejalan dengan itu, Randy dan Dalimi (2025) menunjukkan bahwa kondisi kontingensi N-2 membutuhkan strategi pengamanan yang lebih menyeluruh dibandingkan kontingensi N-1. Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa OGS perlu dikoordinasikan dengan pengaturan governor dan skema pengamanan lainnya, terutama ketika gangguan menyebabkan kehilangan kedua IBT sekaligus.

Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar dalam pengembangan skema pengamanan bertahap pada sistem PLTA Merangin–GITET Bangko. Pada kondisi N-1, pembebanan dan arus transformator dapat digunakan sebagai indikator untuk menentukan kebutuhan penerapan OGS, sedangkan pada kondisi N-2 diperlukan evaluasi tambahan terhadap keseimbangan daya, respons frekuensi, dan kemungkinan terbentuknya sistem islanding. Penelitian Wang et al. (2022) mendukung pendekatan pengendalian yang mempertimbangkan tingkat risiko operasi transformator, sementara penelitian Frontiers in Energy Research (2023) menunjukkan bahwa pengamanan pascapemisahan jaringan perlu memperhatikan batas frekuensi dan karakteristik transien. Oleh karena itu, skema pengamanan yang dikembangkan sebaiknya mengintegrasikan OGS, pengaturan governor, koordinasi proteksi, dan tindakan pengamanan lanjutan. Penerapan tersebut tetap perlu mempertimbangkan kondisi operasi aktual agar pengurangan pembangkitan tidak melebihi kebutuhan sistem dan tidak menimbulkan ketidakseimbangan daya yang lebih besar.

Penelitian ini menggunakan simulasi DIgSILENT PowerFactory berdasarkan parameter dan konfigurasi sistem yang dimodelkan sehingga hasilnya merepresentasikan kondisi sesuai asumsi simulasi. Evaluasi telah menunjukkan penurunan pembebanan IBT yang jelas pada kontingensi N-1 dan memberikan gambaran respons frekuensi pada kondisi N-2. Namun, analisis belum mencakup seluruh variasi kondisi operasi, seperti perubahan beban, variasi pembangkitan, sensitivitas parameter governor, karakteristik waktu kerja proteksi, dan perubahan konfigurasi jaringan. Selain itu, penilaian kestabilan frekuensi masih perlu diperkuat melalui analisis rate of change of frequency (RoCoF), durasi deviasi frekuensi, dan batas operasi peralatan. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan analisis sensitivitas dan optimasi jumlah unit yang dilepas untuk memperoleh skema OGS yang mampu menjaga pembebanan IBT dalam batas aman dengan pengurangan pembangkitan seminimal mungkin. Evaluasi lanjutan terhadap keseimbangan daya pada setiap bagian sistem yang terpisah serta koordinasi OGS dan governor juga diperlukan agar hasil simulasi dapat menjadi dasar teknis yang lebih kuat bagi pengembangan skema pengamanan pada sistem tenaga listrik aktual

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis, penerapan Over Generation Shedding (OGS) pada PLTA Merangin terbukti efektif mengurangi pembebanan Interbus Transformer (IBT) 275/150 kV di GITET Bangko pada kondisi kontingensi N-1. Ketika salah satu IBT keluar dari sistem, pembebanan transformator yang masih beroperasi meningkat hingga 114,1%, dengan arus sekitar 1.100 A, sehingga melampaui kapasitas nominal dan nilai pickup proteksi arus lebih. Penerapan OGS tahap pertama melalui pelepasan satu unit generator sebesar 87,5 MW menurunkan total pembangkitan dari 350 MW menjadi 262,5 MW, sehingga pembebanan IBT turun menjadi 79,85% dengan arus sekitar 765 A. Sementara itu, OGS tahap kedua melalui pelepasan dua unit generator dengan total daya 175 MW menurunkan pembebanan lebih lanjut menjadi 45,3% dengan arus sekitar 430 A. Hasil tersebut menunjukkan bahwa OGS tahap pertama telah memadai untuk mengatasi overload pada skenario N-1 yang diuji, sedangkan tahap kedua memberikan margin pembebanan yang lebih besar. Pada kondisi kontingensi N-2 akibat kehilangan kedua IBT, simulasi menunjukkan perubahan frekuensi yang signifikan, dengan nilai maksimum 53,83 Hz dan minimum 48,53 Hz pada sistem islanding Merangin. Frekuensi kemudian kembali mendekati nilai nominal selama periode simulasi, sementara frekuensi pada sistem Sumatera mencapai sekitar 49,33 Hz pada akhir simulasi. Temuan ini menegaskan bahwa efektivitas OGS tidak hanya ditentukan oleh kemampuannya mengurangi pembebanan transformator, tetapi juga perlu dievaluasi berdasarkan respons frekuensi, keseimbangan daya, dan koordinasi sistem pengamanan setelah gangguan.

Berdasarkan temuan tersebut, pengelola sistem tenaga listrik disarankan mempertimbangkan OGS tahap pertama sebagai tindakan korektif awal pada kondisi kontingensi N-1, dengan OGS tahap kedua sebagai alternatif lanjutan apabila kondisi operasi memerlukan pengurangan

pembangkitan yang lebih besar. Penentuan tahapan dan besarnya pelepasan pembangkit perlu mempertimbangkan pembebanan aktual IBT, pola aliran daya, kondisi beban, tegangan, respons frekuensi, dan koordinasi dengan proteksi arus lebih. Pengembangan skema pengamanan juga perlu mengintegrasikan OGS dengan pengaturan governor dan sistem otomasi gardu induk untuk mengantisipasi gangguan yang lebih berat, khususnya kehilangan kedua IBT. Penelitian selanjutnya disarankan menguji variasi beban puncak dan beban minimum, perubahan pembangkitan, gangguan saluran transmisi, serta variasi konfigurasi jaringan. Analisis dinamik lebih lanjut perlu dilakukan untuk mengevaluasi frekuensi, tegangan, kestabilan transien, rate of change of frequency (RoCoF), dan pemulihan sistem setelah gangguan. Sebelum diterapkan sebagai skema proteksi atau otomasi operasional, hasil simulasi perlu divalidasi menggunakan data operasi aktual serta kajian koordinasi proteksi dan pengujian bertahap untuk memastikan keamanan dan keandalan penerapannya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak yang telah memberi dukungan baik moril maupun materil terhadap pelaksanaan kegiatan ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Bung Hatta, PT. PLN Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Sumatera serta pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyediaan data dan pelaksanaan analisis sistem tenaga listrik pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, A. Y. M., Eldeen, S., Mohamed, G., & Abdelrahim, Y. H. (2016). *Transmission Lines Overload Alleviation by Generation Rescheduling and Load Shedding*. *22*(2011), 1–7. https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000313.

Anshari, M. I., & Facta, M. (2015). *Analisis Over Generation Shedding (Ogs) Pada Subsistem Cibinong 150 Kv Dan 70 Kv*. *4*.

Anshori, W., Busaeri, N., Nugraha, F., Siliwangi, U., Tamansari, K., Taikmalaya, K., & Barat, J. (2026). Studi Inspeksi Dan Setting Proteksi Instantaneous Over Current Relay Pada Motor Primary Air. *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, *14*(1).

Ardiansyah, M. R. (2024). Differential relay settings as protection on a 52 MVA Unit 4 Power Transformer PLTA Singkarak Penyetingan Rele Differensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya 52 MVA Unit 4 PLTA Singkarak. *IJEERE: Indonesian Journal of Electrical Engineering and Renewable Energy*, *4*(June), 1–8.

B.L. Theraja. (2005). *A Text Book Of Electrical Technology* (Volume 1,). S. Chand & Company LTD. Ram Nagar, New Delhi.

Bergen, A. R., & Vittal, V. (2000). *Power systems analysis* (Vol. 2nd). Prentice Hall.

Daniel L. Stufflebeam, G. F. M. (2002). *Evaluation Models*.

Darmana, I. (2024). Evaluasi Kepuasan Pelayanan Penyelenggaraan Uji Kompetensi Tenaga Teknik Usaha Jasa Konstruksi Menggunakan Model Kirkpatrick. *Jurnal Manajemen Pendidikan dan Ilmu Sosial (JMPIS)*, *5*, 2146–2153. https://doi.org/10.38035/jmpis

Darmana, I., Salvayer, A. R., & Erliwati. (2020). Load Shedding Simulation Using A Frequency Relay in Lampung Electrical System. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *990*(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/990/1/012005

Duncan, J. (2012). *Power System Analysis and Design* (Fifth). Stamford, CT : Cengage Learning.

El bouisfi, R., El Menzhi, L., & Chiementin, X. (2022). Supervised Classification Of induction Motors faults. *E3S Web of Conferences*, *336*, 1–8. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233600051

Elgallai, T. (2024). Fault Detection and Condition Monitoring in Induction Motors Utilizing Machine Learning Algorithms. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, *4*(1), 38–46. https://doi.org/10.47709/brilliance.v4i1.3539

Gatot, F. S., & W, W. P. (2022). Reverse Time During Current Relay Performance to Support the Protection System Practicum. *Eksergi : Jurnal Teknik Energi*, *18*(2), 1–6.

Hanson, A. P. (2012). *Power System Control and Stability* (L. L. Grigsby (ed.); Third). Taylor & Francis.

Indonesia, S. N., & Nasional, B. S. (2011). *Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011) Amandemen 1. 2011*(Puil).

Kundur, P., Paserba, J., Ajjarapu, V., Andersson, G., Bose, A., Canizares, C., Hatziargyriou, N., Hill, D., Stankovic, A., Taylor, C., Van Cutsem, T., & Vittal, V. (2004). Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, *19 (2)*, 1387–1401.

Le, K. H. (2019). Performance Evaluation of a Generator Differential Protection Function for a Numerical Relay. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *9*(4), 4342–4348.

Ma, M., & Zondra, E. (2026). *Evaluasi Rugi-Rugi Daya Dan Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Pada Rotary Machine di PT Asia Forestama Raya*. *10*(2), 56–62.

Marulitua, L., Situmeang, U., & Yuvendius, H. (2026). *Analisis Pemasangan Transfomator Sisipan Pada Penyulang Meranti Di PT PLN (Persero) ULP Rumbai*. *10*(2), 48–55.

Multi, A., & Addaus, T. (2022). Analisa Proteksi Over Current Relay (Ocr) Dan Ground Fault Relay (Gfr) Pada Transformator Daya Gardu Induk. *Sainstech: Jurnal Penelitian Dan Pengkajian Sains Dan Teknologi*, *32*(1), 1–8. https://doi.org/10.37277/stch.v32i1.1215

Otong, M., Albantani, M. I., Elektro, D., Teknik, F., Ageng, U. S., & Cilegon, K. (2024). Analisis Pengaruh High Pressure Heater Terhadap Turbine Heat Rate Dan Pemakaian Batubara Di Pltu 1 X 600 Mw. *Presisi*, *13*(2), 150–156. https://doi.org/10.62870/setrum.v13i2.29800

Pardede, D. F. (2024). *Cilegon-Cibinong Conductor Using A Defense Scheme With Over Generation Shedding (Ogs) At Pt Pln (Persero) Uip2b Jamali*. *03*(2), 111–119. https://doi.org/10.57102/jescee.v3i2.94

Safaat, Y. Y., & Samputra, P. L. (2025). *Barriers to the Implementation of Renewable Energy Policies in Indonesia : A Case Study of Solar Energy in Improving Energy Security*. 455–463.

Sulistiawati, I. B., Maturbong, K., & Priyanto, S. (2024). Perancangan Prototype Zelio Smart Relay pada Modifikasi PLTS On Grid untuk Kontinuitas Suplai Daya di Kampus II ITN Malang. *Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, *12*(1), 50–64.

Tobar-Rosero, O. A., Candelo-Becerra, J. E., & Zapata, G. (2022). Performance Analysis of Overcurrent Protection in a Digital Substation with Process Bus. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(13). https://doi.org/10.3390/su14137958

Babaei, M., Muyeen, S. M., & Islam, S. (2021). Transiently stable intentional controlled islanding considering post-islanding voltage and frequency stability constraints. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 127, Article 106650. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106650

Deltuva, R., Lukočius, R., Balsevičius, R., & Kriuglaitė-Jarašiūnienė, M. (2023). Power system analysis during fast desynchronization from synchronous area and operation in islanded mode. Applied Sciences, 13(13), Article 7552. https://doi.org/10.3390/app13137552

Randy, M. A., & Dalimi, R. (2025). Analysis of overload shedding (OLS)–adaptive defense scheme (ADS) on the 150 kV Priok subsystem to enhance the reliability of Jakarta's electricity supply in N-1 N-2 contingency scenarios. International Journal of Computer and Information System, 6(1). https://doi.org/10.29040/ijcis.v6i1.223

Risqi, F., & Sunardiyo, S. (2024). Mitigasi blackout akibat overload melalui implementasi prioritas beban dalam skema overload shedding. ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, 12(3). https://doi.org/10.26760/elkomika.v12i3.612

Sunjaq, A., Chen, P., Bongiorno, M., Majumder, R., & Svensson, J. (2024). Frequency control by BESS for smooth island transition of a hydro-powered microgrid. IET Smart Grid, 7(1), 63–

77. https://doi.org/10.1049/stg2.12140
Tang, F., Guo, Y., Wei, X., Chen, M., Sun, J., & Deng, H. (2023). An intentional controlled islanding strategy considering island frequency stability for power system with wind-power integrated. Frontiers in Energy Research, 11, Article 1247412. https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1247412
Wang, J., Wan, Y., Xiong, Z., Xiong, X., & Ouyang, J. (2022). Cooperative overload control strategy of power grid-transformer considering dynamic security margin of transformer in emergencies. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 140, Article 108098. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108098