

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

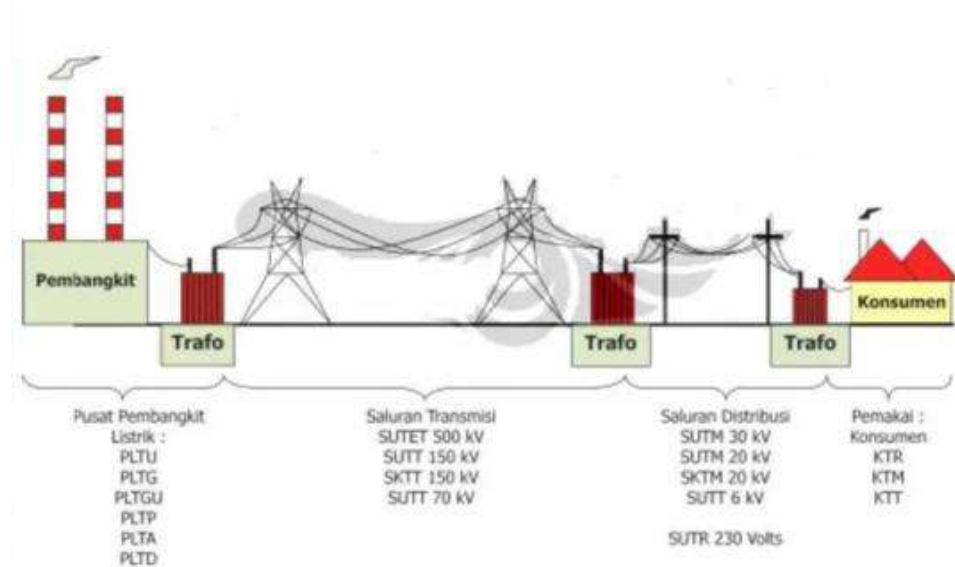
Landasan teori merupakan dasar konseptual yang digunakan untuk menjelaskan prinsip kerja, karakteristik, serta keterkaitan antar komponen dalam sistem tenaga listrik yang menjadi objek penelitian. Pada penelitian ini, landasan teori difokuskan pada sistem tenaga listrik interkoneksi, mekanisme pengamanan sistem, peran gardu induk dan jaringan transmisi, serta konsep pemulihan sistem melalui *blackstart* dan *line charging*. Pemahaman yang komprehensif terhadap teori-teori tersebut sangat diperlukan agar analisis hasil pengujian dapat dilakukan secara sistematis dan sesuai dengan kondisi operasional di lapangan.

2.1.1. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik adalah suatu sistem terintegrasi yang berfungsi untuk membangkitkan, menyalurkan, dan mendistribusikan energi listrik dari sumber pembangkit hingga ke konsumen. Sistem ini terdiri dari tiga subsistem utama, yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi, yang saling terhubung dan bekerja secara simultan. Keandalan sistem tenaga listrik sangat ditentukan oleh kemampuan masing-masing subsistem dalam menjaga kontinuitas pasokan listrik dengan kualitas tegangan dan frekuensi yang sesuai standar.[6]

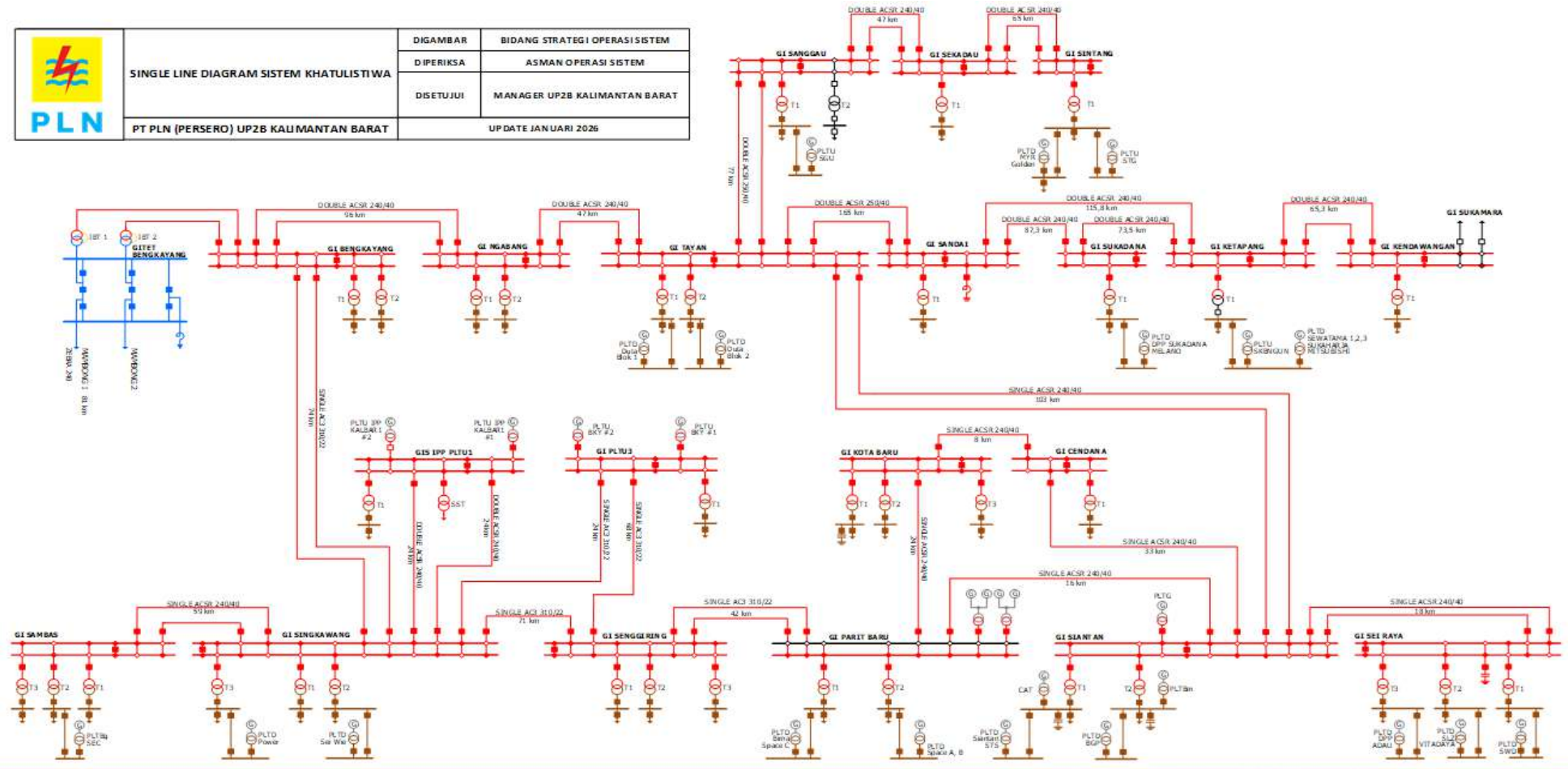
Pada sistem interkoneksi regional seperti Sistem Khatulistiwa, operasi sistem tidak hanya bergantung pada satu pembangkit atau satu jalur transmisi, melainkan merupakan hasil koordinasi dari berbagai pembangkit dan jaringan transmisi yang tersebar di wilayah tertentu. Keuntungan utama dari sistem interkoneksi adalah meningkatnya keandalan pasokan dan efisiensi operasi. Namun demikian, sistem interkoneksi juga memiliki risiko gangguan yang lebih luas apabila terjadi kegagalan besar yang tidak dapat dikendalikan.[7]

Gangguan besar pada sistem tenaga listrik dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara daya pembangkitan dan beban, yang berdampak pada penurunan frekuensi dan tegangan sistem. Apabila kondisi ini tidak segera ditangani, sistem dapat mengalami pemadaman sebagian hingga pemadaman total (*blackout*). Oleh karena itu, sistem tenaga listrik harus dilengkapi dengan skema pengamanan dan pemulihan yang terencana.



Gambar 2. 1 Sistem Tenaga Listrik

	SINGLE LINE DIAGRAM SISTEM KHATULISTIWA	DIGAMBAR	BIDANG STRATEGI OPERASI SISTEM
		DIPERIKSA	ASMAN OPERASI SISTEM
		DISETUJUI	MANAGER UP2B KALIMANTAN BARAT
		PT PLN (PERSERO) UP2B KALIMANTAN BARAT	UPDATE JANUARI 2026



Gambar 2. 2 SLD Sistem Khatulistiwa

2.1.2. Program Anti Black Out (ABO)

Sesuai arahan Dirtrans dengan Nomor : 2298/TRS.00.01/F0140000/2025 dalam rangka peningkatan keandalan saluran kelistrikan maka dibuatlah suatu program yaitu Program Anti Black Out (ABO) yang merupakan suatu sistem pengamanan terpadu pada sistem tenaga listrik yang diterapkan di lingkungan Unit Pelaksana Pengatur Beban (UP2B) sebagai bagian dari strategi pengendalian operasi sistem secara real-time. Program ini memiliki beberapa tujuan menjalankan operasi sistem dan transmisi untuk mengantisipasi kondisi terburuk. Hal ini juga diharapkan menjadi bahas evaluasi seperti penyediaan uji *House Load*, *Blackstart*, dan *Line Charging*.

Dalam operasinya, Program ABO bekerja secara otomatis berdasarkan parameter utama sistem, seperti frekuensi, tegangan, dan pembebanan jaringan. Ketika terjadi gangguan besar — misalnya lepasnya pembangkit utama atau gangguan transmisi — sistem akan mendeteksi penurunan frekuensi (*under frequency*) atau tegangan (*under voltage*). Jika parameter melewati batas setting yang telah ditentukan, maka skema pertahanan sistem akan mengaktifkan pelepasan beban bertahap (*load shedding*) atau pemisahan area sistem (*system splitting*) untuk menjaga keseimbangan daya antara pembangkitan dan beban.

Secara operasional, implementasi ABO berada di bawah koordinasi pusat pengatur beban seperti PT PLN (Persero) melalui unit UP2B (Unit Pelaksana Pengatur Beban). UP2B bertanggung jawab dalam:

- a. Menjalankan operasi sistem dan transmisi berfokus pada antisipasi kondisi terburuk (gangguan).
- b. Menjalankan operasi pada kondisi normal, agar pola operasi keandalan diatas keekonomian
- c. Melakukan mitigas jalur-jalur backbone dalam hal pemeliharaan di transmisi.
- d. Memastikan pemulihan gangguan dapat diselesaikan dalam jangka waktu 1 jam.

ABO biasanya terintegrasi dengan sistem proteksi seperti:

- a. *Under Frequency Relay (UFR)*
- b. *Under Voltage Relay (UVR)*
- c. Sistem SCADA dan EMS (*Energy Management System*)

Tujuan utama penerapan ABO adalah:

- a. Mencegah terjadinya pemadaman total (*blackout system*).
- b. Menjaga stabilitas frekuensi tetap mendekati 50 Hz.
- c. Mengurangi dampak gangguan agar tidak menyebar luas.
- d. Mempercepat proses pemulihan sistem (*system restoration*).

Dengan adanya Program Anti *Black Out*, sistem tenaga listrik menjadi lebih andal, responsif terhadap gangguan besar, serta mampu mempertahankan kontinuitas penyaluran energi listrik kepada pelanggan prioritas.

Nomor : 2298/TRS.00.01/F01040000/2025 13 Januari 2025
 Lampiran : *
 Sifat : Segera - Biasa
 Hal : Arahan Program Anti Black Out dan Kepada
 Peningkatan Keandalan Sistem Yth. *) terlampir
 Ketenagalistrikan

Sehubungan dengan pelaksanaan Rapat Pembahasan Evaluasi Gangguan 2024 dan Usulan Program Peningkatan Keandalan 2025 pada tanggal 30-31 Desember 2024 yang lalu, dengan ini kami sampaikan arahan sebagai berikut:

1. Pada proses menjalankan operasi sistem dan transmisi agar berfokus pada pelayanan ke pelanggan dan antisipasi kondisi terburuk (*start with the end*). Bagaimana upaya menghindari gangguan terjadi, jika terjadi gangguan diupayakan tidak meluas, dan jika gangguan meluas proses pemulihan dan penormalan harus diselesaikan dengan cepat, sehingga dampak ke pelanggan dapat diminimumkan.
2. Dalam menjalankan operasi pada kondisi normal, agar diterapkan pola operasi keandalan, di atas keekonomian. Gangguan meluas seringkali terjadi bersamaan dengan pelaksanaan pekerjaan pemeliharaan. Untuk itu diperlukan evaluasi yang mendalam dan komprehensif pada setiap rencana pekerjaan pemeliharaan, khususnya pada jalur-jalur *backbone*. Mitigasi terhadap risiko terburuk harus disiapkan, termasuk dengan pemilihan opsi pemadaman terencana dibanding dengan mengambil risiko terjadinya gangguan meluas / *blackout system*.
3. Pada kajian risiko yang berkaitan dengan kebutuhan pemadaman selama pekerjaan transmisi, apabila risiko dari keterlambatan atau tidak dilaksanakannya pemeliharaan lebih besar dibandingkan dengan risiko pemadaman parsial yang diperlukan untuk pelaksanaan pemeliharaan, maka pemeliharaan harus dilakukan dengan koordinasi bersama *stakeholder* terkait, termasuk fungsi distribusi.
4. Pemulihan gangguan meluas agar dapat diselesaikan maksimal 3 jam, sesuai dengan *Service Level Agreement* (SLA) antara PLN dengan pelanggan, dan semua GI sudah bertegangan dalam jangka waktu maksimal 1 jam. Untuk mencapai hal tersebut diperlukan desain *defense scheme* yang mutakhir serta kelengkapan sarana prasarana pemulihan.
5. Melakukan *review* terkait pekerjaan pada jaringan untuk menghindari gangguan meluas akibat pekerjaan di pemeliharaan, termasuk didalamnya kajian subsistem yang dapat mempertahankan dan mempermudah membangun subsistem dengan *defense scheme* yang ada.
6. *Job Safety Analysis* (JSA) dalam setiap pekerjaan pemeliharaan harus memuat mitigasi kondisi terburuk yang dapat terjadi saat pekerjaan. Apabila ada resiko yang tidak termitigasi / adanya *checklist* yang tidak lengkap maka pekerjaan dapat ditunda, bila tetap diputuskan untuk dilanjutkan, maka perlu *approval* dari *General Manager* (GM) setempat.
7. Pada kasus-kasus rencana pemeliharaan khusus yang tidak dapat diputuskan pada level GM dan EVP, agar dieskalasi ke level Direksi.
8. Melaksanakan evaluasi:
 - a. Infrastruktur: pembangkitan (*house load, black start, line charging*) terkait titik kerawanan dan perbaikannya.
 - b. Tools: simulasi *line charging* diuji dengan kondisi *real* atau jika tidak memungkinkan dapat diuji melalui *Dispatcher Training Simulator* (DTS).
 - c. Dilaksanakannya analisis *post mortem* untuk mengevaluasi kejadian dan mempersiapkan mitigasi resiko sehingga dapat menghindari kejadian berulang.



9. Setiap unit agar menyiapkan *roadmap* program *Anti Blackout* (ABO) untuk 5 tahun ke depan, termasuk prioritas penyediaan infrastruktur/pebiayaan program, perkuatan sistem, dan percepatan penormalan gangguan.

Demikian kami sampaikan, agar dapat dilaksanakan sesuai arahan untuk menjadi perhatian bersama.

DIREKTUR
TRANSMISI DAN PERENCANAAN
SISTEM,



E. HARYADI

Tembusan:

1. EVP OSL PLN
2. EVP TKS PLN
3. EVP TSJ PLN
4. EVP RST PLN

Gambar 2. 3 Surat Perintah Kerja Program ABO



Surat No 2298/TRS.00.01/F01040000/2025
Tanggal 13 Januari 2025

*) Terlampir:

1. GENERAL MANAGER UIP2B JAMALI
2. GENERAL MANAGER UIP3B SUMATERA
3. GENERAL MANAGER UIP3B KALIMANTAN
4. GENERAL MANAGER UIP3B SULAWESI
5. GENERAL MANAGER UIW NTT
6. GENERAL MANAGER UIW NTB
7. GENERAL MANAGER UIW P2B
8. GENERAL MANAGER UIW MMU
9. GENERAL MANAGER UIW BABEL
10. GENERAL MANAGER UIT JBB
11. GENERAL MANAGER UIT JBT
12. GENERAL MANAGER UIT JBM

SALINAN

Jl.  Blok M/135 ~~Kabupaten~~ Baru Jakarta 12160
T (021) 7261875, 7261122, 7262234, 7261234, 7260550
F (021) 7221330, 7397150 W www.pln.co.id



Gambar 2. 4 Arahan DirTrans terkait Program Anti BO

Tujuan utama dari penerapan ABO adalah menjaga stabilitas sistem dan mencegah kerusakan peralatan akibat kondisi operasi yang tidak normal. Namun, dalam kondisi

gangguan besar tertentu, ABO dapat menyebabkan pemisahan sistem secara luas yang berujung pada pemadaman total. Kondisi inilah yang menuntut adanya strategi pemulihan sistem yang cepat dan terstruktur.

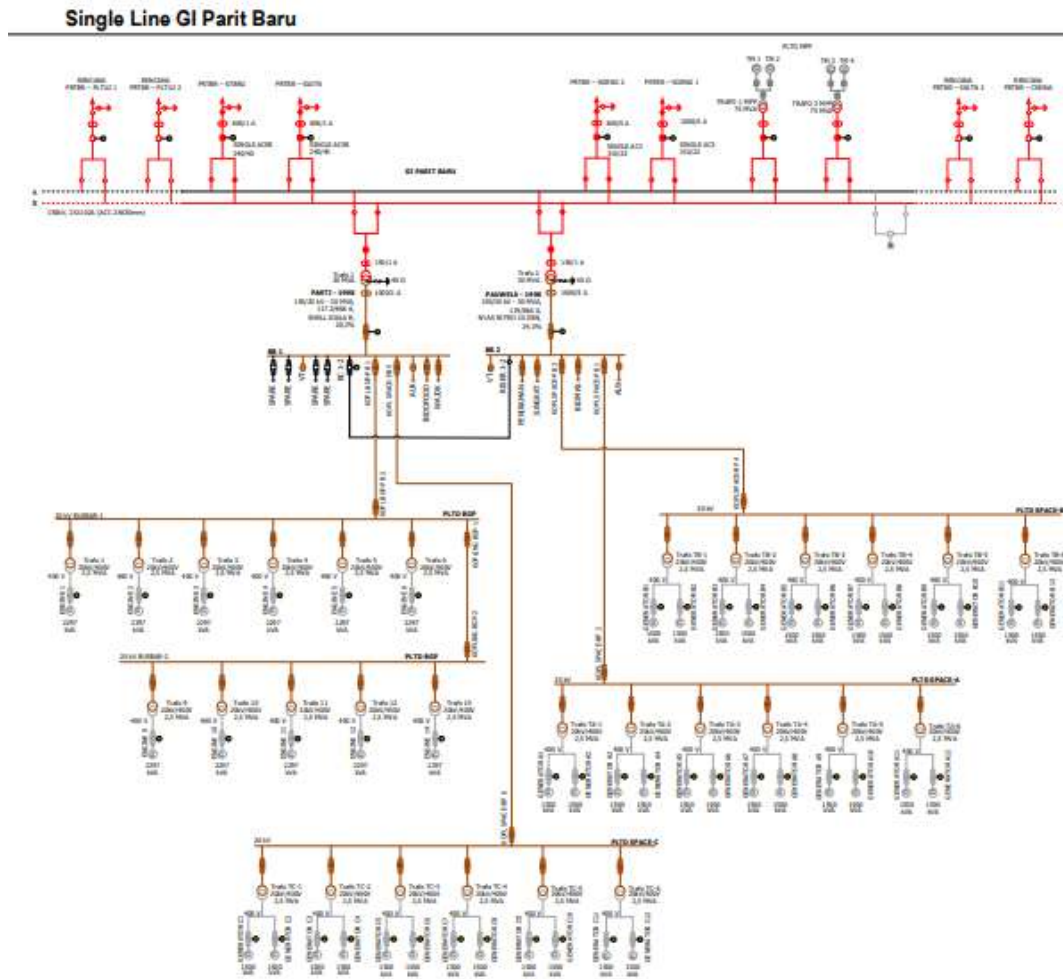
Dalam konteks pemulihan sistem, ABO tidak hanya dipandang sebagai sistem proteksi, tetapi juga sebagai bagian dari rangkaian kejadian yang harus dipertimbangkan dalam penyusunan skenario blackstart dan line charging. Oleh karena itu, pemahaman terhadap mekanisme kerja ABO menjadi penting dalam analisis pemulihan Sistem Khatulistiwa.

2.1.3. Gardu Induk

Gardu induk merupakan fasilitas utama dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai titik penghubung antara jaringan transmisi dan distribusi[8]. Di gardu induk dilakukan proses pengubahan tingkat tegangan menggunakan transformator daya, pengaturan aliran daya, serta pengamanan sistem melalui peralatan proteksi dan pemutus tenaga.[9]



Gambar 2. 5 Gardu Induk 150 kV Parit Baru



Gambar 2. 6 Singel Line Diagram GI Parit Baru

Gardu Induk Parit Baru beroperasi pada tingkat tegangan 150 kV dan berfungsi sebagai salah satu pusat penyaluran daya utama di wilayah Sistem Khatulistiwa. GI Parit Baru dilengkapi dengan dua unit transformator daya, masing-masing memiliki kapasitas 30 MVA, sehingga total kapasitas terpasang pada gardu induk ini adalah 60 MVA.

Kapasitas transformator tersebut dirancang untuk melayani beban sistem secara andal serta memberikan fleksibilitas operasi. Dengan konfigurasi dua transformator, GI Parit Baru memiliki tingkat keandalan yang lebih baik karena apabila salah satu transformator mengalami gangguan atau pemeliharaan, transformator lainnya masih dapat menopang

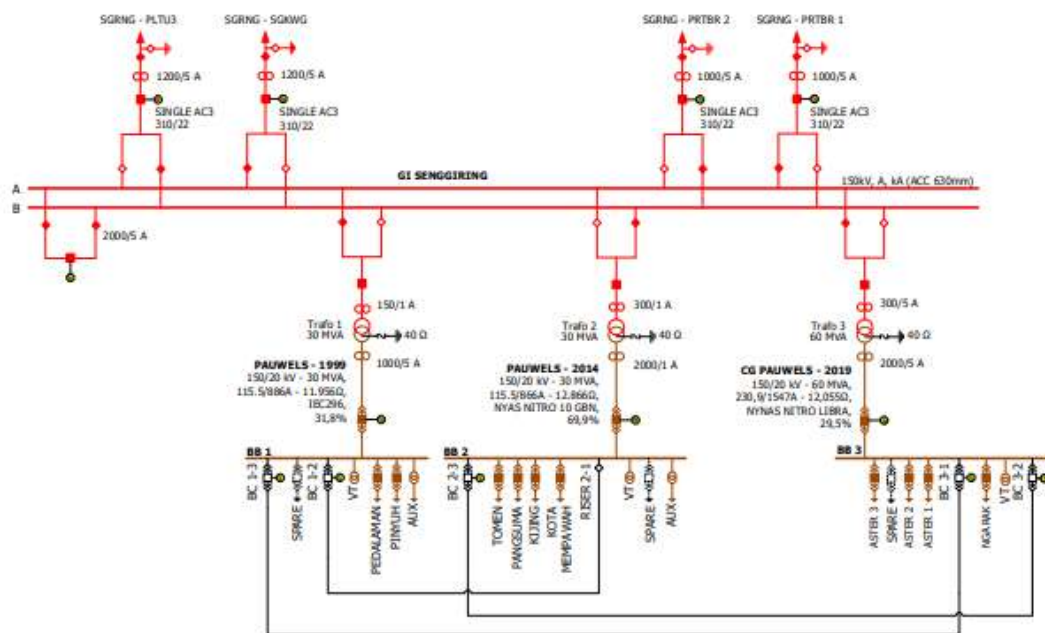
sebagian beban sistem. Kondisi ini sangat penting dalam menjaga kontinuitas pasokan listrik, terutama pada saat sistem berada dalam kondisi kritis.

Dalam konteks pemulihan sistem, GI Parit Baru memiliki peran penting sebagai titik awal energisasi jaringan setelah pembangkit blackstart berhasil dioperasikan. Transformator di GI Parit Baru akan menerima suplai awal dari pembangkit, kemudian menyalurkan tegangan ke jaringan transmisi dan distribusi secara bertahap. Oleh karena itu, kesiapan peralatan transformator, sistem proteksi, serta konfigurasi operasi di GI Parit Baru sangat menentukan keberhasilan proses blackstart dan line charging.



Gambar 2. 7 Gardu Induk 150 kV Senggiring

Single Line Senggiring



Gambar 2. 8 Singel Line Diagram GI Senggiring

Gardu Induk Senggiring juga merupakan gardu induk 150 kV yang berperan sebagai salah satu pusat beban dan penyaluran daya penting dalam Sistem Khatulistiwa. GI Senggiring memiliki konfigurasi transformator yang lebih besar dibandingkan GI Parit Baru, yaitu terdiri dari tiga unit transformator daya, dengan rincian dua unit transformator berkapasitas 30 MVA dan satu unit transformator berkapasitas 60 MVA. Dengan demikian, total kapasitas terpasang di GI Senggiring mencapai 120 MVA.

Kapasitas transformator yang lebih besar menunjukkan bahwa GI Senggiring melayani beban sistem yang relatif tinggi dan memiliki peran signifikan dalam menjaga kestabilan pasokan listrik di wilayah sekitarnya. Keberadaan transformator 60 MVA memungkinkan gardu induk ini untuk menyalurkan daya dalam jumlah besar, baik dalam kondisi operasi normal maupun pada saat pemulihan sistem.

Dalam proses pemulihan sistem pasca *blackout*, GI Senggiring menjadi salah satu tujuan utama energisasi setelah jalur transmisi berhasil di-charge dari sumber pembangkit

blackstart. Proses ini harus dilakukan secara bertahap untuk menghindari terjadinya lonjakan arus dan overtegangan yang dapat mengganggu kestabilan sistem. Oleh karena itu, koordinasi antara GI Parit Baru dan GI Senggiring melalui jaringan transmisi 150 kV menjadi faktor kunci dalam keberhasilan pemulihan Sistem Khatulistiwa.

Secara keseluruhan, GI Parit Baru dan GI Senggiring memiliki peran saling melengkapi dalam sistem. GI Parit Baru berfungsi sebagai titik awal penyaluran daya dari pembangkit blackstart, sedangkan GI Senggiring berperan sebagai pusat beban dan distribusi lanjutan. Perbedaan kapasitas transformator di kedua gardu induk tersebut mencerminkan perbedaan fungsi dan tingkat beban yang dilayani.

Dalam pengujian *blackstart* dan *line charging*, keberhasilan energisasi dari GI Parit Baru menuju GI Senggiring menjadi indikator penting kesiapan sistem dalam mempercepat pemulihan pasokan listrik. Oleh karena itu, analisis terhadap konfigurasi dan kapasitas transformator pada kedua gardu induk ini menjadi bagian penting dalam evaluasi keandalan Sistem Khatulistiwa.

2.1.4. Transformator Daya

Transformator daya merupakan peralatan listrik statis yang berfungsi untuk mengubah level tegangan listrik sesuai dengan kebutuhan sistem. Pada sistem transmisi 150 kV, transformator berperan dalam menyesuaikan tegangan antara sisi pembangkitan, transmisi, dan distribusi.[10]



Gambar 2. 9 Transformator Daya 30 MVA GI Parit Baru

Dalam proses pemulihan sistem, transformator memiliki karakteristik khusus yang harus diperhatikan, terutama terkait arus magnetisasi awal (*inrush current*). Arus ini dapat bernilai sangat besar pada saat transformator pertama kali dienergize, sehingga berpotensi memicu kerja sistem proteksi apabila tidak dikendalikan dengan baik[11]. Oleh karena itu, pengoperasian transformator dalam kondisi pemulihan sistem harus dilakukan secara terencana dan bertahap. Pemahaman terhadap karakteristik transformator daya menjadi penting dalam analisis keberhasilan uji blackstart dan line charging.

Tabel 2. 1 Nameplate Transformator 2 Parit Baru 30 MVA

No	Parameter	Spesifikasi
1	Merk dan Tahun Pembuatan	<i>PAUWELS, 2008</i>
2	Standar	<i>IEC 60076</i>
3	Jenis dan Nomor Seri	<i>Step-Up / 3 phase / 07P0045</i>
4	Kapasitas Daya	<i>30 MVA</i>
5	Frekuensi	<i>50 Hz</i>
6	Tipe Pendingin	<i>ONAN</i>
7	Rasio Tegangan	<i>20 kV / 150 kV</i>
8	<i>Connection Symbol</i>	<i>YNyn0 (D5)</i>
9	<i>Tap Changer</i>	<i>MR-VIII200 – 76 + ED</i>

2.1.5. Sistem Transmisi 150 kV

Sistem transmisi tenaga listrik merupakan bagian penting dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkitan menuju pusat beban atau gardu induk dengan tingkat efisiensi dan keandalan yang tinggi[12]. Pada Sistem Khatulistiwa, saluran transmisi 150 kV Parit Baru – Senggiring berperan sebagai salah satu jalur utama dalam penyaluran daya serta memiliki peranan strategis dalam proses pemulihan sistem pasca gangguan besar (blackout).



Gambar 2. 10 Saluran Transmisi Listrik

Saluran transmisi 150 kV ini menghubungkan Gardu Induk Parit Baru sebagai salah satu titik awal penyaluran daya dengan Gardu Induk Senggiring yang berfungsi sebagai pusat beban dan distribusi lanjutan. Keberadaan jalur transmisi ini memungkinkan penyaluran daya dari pembangkit, termasuk pembangkit yang memiliki kemampuan *blackstart*, menuju wilayah beban secara bertahap dan terkontrol.[13]

Secara teknis, saluran transmisi 150 kV memiliki karakteristik listrik berupa resistansi, induktansi, dan kapasitansi yang mempengaruhi perilaku sistem, terutama pada kondisi tanpa beban atau beban ringan. Pada kondisi pemulihan sistem, ketika pembangkit baru saja berhasil melakukan *blackstart*, saluran transmisi umumnya berada dalam kondisi tanpa beban. Kondisi ini menyebabkan efek kapasitansi saluran menjadi dominan, yang dapat menimbulkan kenaikan tegangan di ujung saluran (*overvoltage*).

Fenomena overtegangan pada saluran transmisi 150 kV menjadi salah satu tantangan utama dalam proses pemulihan sistem. Apabila tidak dikendalikan dengan baik, overtegangan dapat memicu kerja sistem proteksi, merusak peralatan, atau bahkan

menyebabkan kegagalan proses energisasi jaringan. Oleh karena itu, energisasi saluran transmisi tidak dapat dilakukan secara langsung dan sembarangan, melainkan harus mengikuti prosedur yang dikenal sebagai line charging.

Line charging merupakan proses pengisian tegangan pada saluran transmisi secara bertahap dari sumber pembangkit yang telah berhasil melakukan *blackstart*. Dalam pelaksanaan line charging Parit Baru – Senggiring, sumber tegangan awal berasal dari pembangkit blackstart, kemudian disalurkan melalui Gardu Induk Parit Baru menuju Gardu Induk Senggiring. Proses ini dilakukan dengan memperhatikan batasan tegangan, arus, serta kondisi peralatan di kedua ujung saluran.

Selain itu, koordinasi antara operator sistem, sistem proteksi, dan peralatan pengaman di sepanjang jalur transmisi menjadi faktor yang sangat penting. Pengaturan urutan penutupan pemutus tenaga (*circuit breaker*), pengawasan nilai tegangan, serta kesiapan sistem proteksi harus dilakukan secara cermat untuk memastikan bahwa proses *line charging* berjalan aman dan stabil.

Dalam konteks Sistem Khatulistiwa, keberhasilan energisasi saluran transmisi 150 kV Parit Baru – Senggiring menjadi indikator penting kesiapan sistem dalam mempercepat pemulihan pasokan listrik. Saluran ini tidak hanya berfungsi sebagai media penyaluran daya, tetapi juga sebagai penghubung utama antara pembangkit *blackstart* dan pusat beban yang lebih luas. Oleh karena itu, evaluasi terhadap kondisi dan kinerja saluran transmisi ini menjadi bagian penting dalam pengujian blackstart dan line charging.

Secara keseluruhan, sistem transmisi 150 kV Parit Baru – Senggiring memiliki peran strategis dalam menjaga kontinuitas dan keandalan Sistem Khatulistiwa, baik pada kondisi operasi normal maupun pada saat pemulihan sistem pasca gangguan besar. Pemahaman yang mendalam terhadap karakteristik dan prosedur pengoperasian saluran transmisi ini menjadi dasar penting dalam analisis dan perumusan strategi mitigasi gangguan pada sistem tenaga listrik.

2.1.6. Feeder 20 kV

Feeder 20 kV merupakan bagian dari sistem distribusi tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan energi listrik dari gardu induk menuju pelanggan atau pusat-pusat beban. Pada sistem tenaga listrik, feeder 20 kV menjadi penghubung terakhir sebelum energi listrik diturunkan ke tegangan rendah melalui gardu distribusi. Oleh karena itu, keandalan feeder 20 kV sangat berpengaruh terhadap kontinuitas pasokan listrik kepada konsumen.[14]

Dalam Sistem Khatulistiwa, *feeder 20 kV* disuplai dari gardu induk 150 kV, seperti GI Parit Baru dan GI Senggiring, melalui transformator daya. Feeder ini melayani berbagai jenis beban, mulai dari beban rumah tangga, komersial, hingga industri, dengan karakteristik konsumsi daya yang berbeda-beda. Kondisi tersebut menyebabkan pengoperasian feeder 20 kV harus dilakukan secara fleksibel dan terkoordinasi dengan kondisi sistem secara keseluruhan.

Pada kondisi operasi normal, *feeder 20 kV* beroperasi secara kontinu mengikuti kebutuhan beban. Namun, pada kondisi gangguan besar hingga terjadi *blackout*, *feeder 20 kV* akan berada dalam kondisi tidak bertegangan. Dalam proses pemulihan sistem, *feeder 20 kV* tidak dapat langsung dihubungkan secara bersamaan karena keterbatasan daya pembangkitan yang tersedia pada tahap awal pemulihan, khususnya ketika sistem masih bergantung pada pembangkit *blackstart*.

Oleh karena itu, pengoperasian *feeder 20 kV* pada tahap pemulihan sistem dilakukan secara bertahap dan selektif. Penyambungan feeder diawali dengan beban prioritas, seperti beban penting dan beban dengan karakteristik stabil, untuk menjaga keseimbangan antara daya pembangkitan dan daya beban. Penyambungan beban secara tiba-tiba dalam jumlah besar dapat menyebabkan penurunan frekuensi dan tegangan sistem, yang berpotensi mengganggu kestabilan operasi pembangkit *blackstart*.



Gambar 2. 11 *Fedeer* 20 kV Busbar 2 GI Parit Baru

Selain itu, karakteristik beban pada *feeder* 20 kV juga mempengaruhi keberhasilan pemulihan sistem. Beban induktif yang dominan, seperti motor listrik, dapat menimbulkan lonjakan arus awal (*starting current*) yang cukup besar. Oleh karena itu, operator sistem harus mempertimbangkan urutan penyambungan *feeder* agar tidak menimbulkan gangguan lanjutan selama proses pemulihan berlangsung.[15]

Dalam kaitannya dengan pengujian *blackstart* dan *line charging*, *feeder* 20 kV berperan sebagai indikator kesiapan sistem dalam menerima suplai daya secara bertahap. Keberhasilan penyambungan *feeder* menunjukkan bahwa sistem telah mencapai kondisi yang cukup stabil untuk melayani beban. Dengan demikian, evaluasi terhadap proses energisasi *feeder* 20 kV menjadi bagian penting dalam analisis pemulihan Sistem Khatulistiwa. Secara keseluruhan, *feeder* 20 kV tidak hanya berfungsi sebagai sarana penyaluran daya ke pelanggan, tetapi juga sebagai elemen penting dalam strategi pemulihan sistem tenaga listrik. Pengelolaan *feeder* yang tepat dan terkoordinasi dengan pembangkit serta jaringan transmisi akan mendukung percepatan pemulihan sistem dan meningkatkan keandalan pasokan listrik pada Sistem Khatulistiwa.

2.1.7. *Blackstart* pada PLTG MPP Parit Baru

Blackstart merupakan kemampuan suatu pembangkit tenaga listrik untuk melakukan proses start awal dan menghasilkan tegangan tanpa memerlukan pasokan listrik dari sistem eksternal. Kemampuan ini sangat penting dalam kondisi gangguan besar yang menyebabkan pemadaman menyeluruh (*blackout*), di mana seluruh sistem tenaga listrik berada dalam

kondisi tidak bertegangan. Dalam Sistem Khatulistiwa, PLTG MPP Parit Baru Blok 2 Unit 4 ditetapkan sebagai salah satu pembangkit yang memiliki peran strategis dalam mendukung proses pemulihan sistem melalui mekanisme blackstart.[16]



Gambar 2. 12 Pembangkit Listrik Tenaga Gas MPP Blok 2 Unit 4

PLTG MPP Parit Baru merupakan pembangkit listrik tenaga gas yang dirancang untuk memiliki waktu start yang relatif cepat dibandingkan dengan jenis pembangkit lainnya. Karakteristik ini menjadikan PLTG sangat sesuai untuk dijadikan sumber awal pemulihan sistem. Pada kondisi *blackout*, PLTG MPP Parit Baru dapat melakukan start dengan memanfaatkan sumber energi internal, seperti sistem baterai dan sistem bantu (*auxiliary system*), sehingga mampu menghasilkan daya listrik awal secara mandiri.

Proses *blackstart* pada PLTG MPP Parit Baru diawali dengan pengaktifan sistem bantu pembangkit, termasuk sistem pelumasan, sistem pendingin, sistem kontrol, dan sistem proteksi. Setelah seluruh sistem bantu berada dalam kondisi siap, turbin gas dapat dijalankan hingga mencapai kecepatan dan kondisi operasi yang memungkinkan generator menghasilkan tegangan. Tegangan awal yang dihasilkan ini kemudian digunakan sebagai

sumber untuk mengenergize peralatan lain dalam sistem, seperti gardu induk dan jaringan transmisi.

Dalam konteks pemulihan Sistem Khatulistiwa, tegangan yang dihasilkan dari PLTG MPP Parit Baru disalurkan menuju Gardu Induk Parit Baru sebagai titik awal energisasi jaringan. Dari gardu induk tersebut, proses pemulihan dilanjutkan dengan pengisian tegangan pada saluran transmisi 150 kV melalui prosedur *line charging*, sebelum akhirnya menyalurkan daya ke gardu induk lain dan feeder 20 kV secara bertahap.

Keberhasilan proses blackstart sangat bergantung pada kestabilan operasi pembangkit pada kondisi beban awal yang relatif kecil dan berubah-ubah. Pada tahap awal pemulihan, PLTG harus mampu menjaga kestabilan frekuensi dan tegangan meskipun sistem masih belum terhubung dengan beban yang besar. Oleh karena itu, pengaturan pembebanan dilakukan secara bertahap dengan memperhatikan kemampuan unit pembangkit serta kondisi sistem secara keseluruhan.

Selain itu, koordinasi antara operator pembangkit dan operator sistem menjadi faktor penting dalam pelaksanaan blackstart. Kesalahan dalam pengaturan urutan operasi atau penyambungan beban dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem yang berujung pada kegagalan pemulihan. Oleh karena itu, pengujian blackstart pada PLTG MPP Parit Baru dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh tahapan dan prosedur operasi dapat berjalan sesuai dengan skenario yang telah direncanakan.

Secara keseluruhan, blackstart pada PLTG MPP Parit Baru memiliki peran kunci dalam mempercepat proses pemulihan Sistem Khatulistiwa. Keandalan pembangkit dalam melakukan start mandiri, menghasilkan tegangan awal yang stabil, serta mendukung energisasi jaringan transmisi dan distribusi secara bertahap menjadi indikator utama kesiapan sistem dalam menghadapi kondisi darurat. Oleh karena itu, analisis terhadap proses dan hasil pengujian blackstart pada PLTG MPP Parit Baru menjadi bagian penting dalam kajian peningkatan keandalan sistem tenaga listrik.

2.1.8. Uji *Blackstart* dan *Line Charging*

Uji blackstart dan line charging merupakan kegiatan pengujian operasional yang dilakukan untuk memastikan kesiapan sistem tenaga listrik dalam menghadapi kondisi pemadaman menyeluruh (*blackout*). Pengujian ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa pembangkit yang memiliki kemampuan blackstart, jaringan transmisi, serta gardu induk dapat beroperasi sesuai dengan skenario pemulihan yang telah ditetapkan.[17]



Gambar 2. 13 Uji Blackstart & Line Charging

Uji blackstart diawali dengan kondisi sistem tanpa tegangan, di mana seluruh pembangkit dan jaringan telah di konfigurasi dan berada dalam keadaan tidak beroperasi. Pada tahap ini, PLTG MPP Parit Baru Blok 2 Unit 4 melakukan start mandiri menggunakan sistem bantu internal hingga mampu menghasilkan tegangan dan daya awal. Keberhasilan tahap ini menjadi prasyarat utama untuk melanjutkan proses pemulihan sistem.

Setelah pembangkit berhasil menghasilkan tegangan yang stabil, tahap berikutnya adalah line charging, yaitu proses pengisian tegangan pada saluran transmisi 150 kV secara

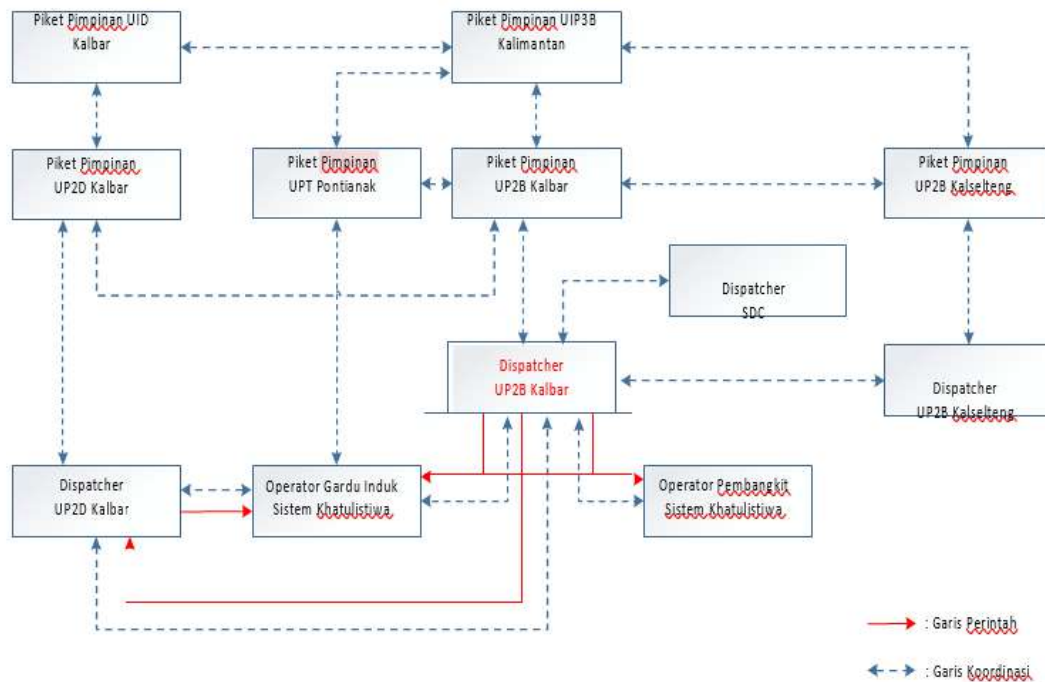
bertahap. Line charging dilakukan dari sisi Gardu Induk Parit Baru menuju Gardu Induk Senggiring melalui Bay Line 150 kV Parit Baru – Senggiring 2. Proses ini harus dilakukan dengan pengawasan ketat terhadap parameter tegangan dan arus untuk menghindari terjadinya overtegangan akibat efek kapasitansi saluran transmisi.

Selama proses line charging, sistem masih berada dalam kondisi beban ringan atau tanpa beban. Oleh karena itu, kestabilan tegangan dan frekuensi sangat bergantung pada kemampuan pembangkit blackstart dalam mengatur daya keluaran. Apabila terjadi penyimpangan parameter sistem di luar batas yang diizinkan, proses energisasi harus dihentikan untuk mencegah gangguan lanjutan.

Setelah saluran transmisi berhasil dienergize, proses pemulihan dilanjutkan dengan pengoperasian transformator di gardu induk serta penyambungan beban melalui feeder 20 kV secara bertahap. Seluruh rangkaian uji blackstart dan line charging ini menghasilkan data operasional yang sangat penting, seperti waktu pemulihan, respons tegangan dan frekuensi, serta kestabilan sistem selama proses berlangsung. Data tersebut menjadi dasar analisis dalam menilai efektivitas skenario pemulihan sistem tenaga listrik.

2.1.9. Alur Komunikasi dan Koordinasi

Sistem pengaman tenaga listrik merupakan sistem pengaman dan peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik, seperti generator, busbar, trafo, dan transmisi dan lain sebagainya terhadap kondisi abnormal operasi sistem tenaga listrik tersebut.



Gambar 2. 14 Alur diagram komunikasi

2.1.10. Operator Pengatur Beban UP2B Kalimantan Barat (*Dispatcher*)

Dispatcher UP2B Kalimantan Barat adalah pelaksana pengendali pada sistem kelistrikan di Sistem Khatulistiwa yang memiliki tanggung jawab antara lain:

1. Mengoperasikan sistem kelistrikan dengan berpedoman kepada rencana operasi yang telah dibuat, untuk mencapai sistem tenaga listrik yang andal, bermutu baik dan ekonomis dengan tetap memprioritaskan keselamatan petugas dan kondisi peralatan.
2. Berkoordinasi dengan Dispatcher Kalselteng didalam pengaturan pembebanan sistem, regional balance dan pengaturan transfer antar sistem dengan mempertimbangkan stabilitas sistem dimasing-masing sistem.Melakukan checklist tahapan UFR secara berkala.

3. Melakukan koordinasi pada manajemen terkait kondisi sistem secara menyeluruh

2.1.11. Operator Gardu Induk Sistem Khatulistiwa

Bertugas mengoperasikan peralatan transmisi dan gardu induk sesuai dengan kemampuan peralatan atas perintah Dispatcher Kalbar.

Kewenangan Batasan Operasi Sistem untuk:

- a. Membuka/menutup peralatan transmisi dan gardu induk yang beroperasi bila terjadi gangguan atau pada kondisi darurat.
- b. Mengoperasikan peralatan 150 kV melalui HMI, BCU atau Kontrol Panel berdasarkan perintah Dispatcher UP2B Kalimantan Barat.
- c. Mengoperasikan peralatan 20 kV kopling Pembangkit (Feeder Ekspres) berdasarkan perintah Dispatcher UP2B Kalimantan Barat dan berkoordinasi pelepasannya dengan Dispatcher UP2D Kalimantan Barat.
- d. Melaporkan kepada UPT/ULTG apabila peralatan tidak bisa dioperasikan dari HMI, BCU atau kontrol panel
- e. Mengoperasikan peralatan 20 kV incoming Trafo, BC 20 kV, 20 kV Penyulang berdasarkan perintah Dispatcher UP2D Kalimantan Barat.
- f. Berkoordinasi dengan Dispatcher UP2B Kalbar dan Dispatcher UP2D Kalimantan Barat saat pelaksanaan buka/tutup PMT 20 kV Incoming trafo, BC 20 kV, dan kopling Pembangkit (Feeder Ekspres) pada jaringan 20 kV karena adanya pemeliharaan sesuai jadwal pemeliharaan dan atau penormalan gangguan.
- g. Berkoordinasi dengan Dispatcher UP2B Kalbar saat pelaksanaan buka/tutup PMT, PMS Rel, PMS line transmisi, trafo, reaktor, kapasitor dan Grounding Fleksibel/lokal pada jaringan 150 kV karena adanya pemeliharaan sesuai jadwal pemeliharaan terpadu.

2.1.12. Dispatcher UP2D Kalimantan Barat

Tugas dan Tanggung Jawab:

- a. Mengoperasikan jaringan Tegangan Menengah yang sudah dilengkapi Sistem SCADA Distribusi Kalimantan Barat\
- b. Melakukan manuver buka/tutup (switching) PMT 20 kV di Gardu Induk secara remote berkoordinasi dengan Operator Gardu Induk
- c. Melakukan manuver buka/tutup (switching) key point (Recloser, LBS, PMCB) secara remote berkoordinasi dengan Piket UP3 terkait di Wilayah Kalbar
- d. Melakukan manuver buka/tutup PMT 20 kV Incoming trafo, BC 20 kV, dan kopling Pembangkit (Feeder Ekspres) pada jaringan 20 kV, atas perintah Dispatcher UP2B Kalimantan Barat.
- e. Mengkoordinasikan pemeliharaan jaringan distribusi dengan Piket UP3 terkait.
- f. Melakukan DSM (Demand Side Management) penyulang 20 kV sesuai permintaan Dispatcher UP2B dan berkoordinasi dengan Operator UP3
- g. Melaporkan kepada Piket Pimpinan UP2D Kalbar tentang kejadian penting yang terjadi pada penyulang atau jaringan distribusi

Kewenangan Batasan Operasi Sistem untuk:

- a. Memerintahkan buka/tutup PMT 20 kV Penyulang Kalbar
- b. Memerintahkan buka/tutup key point (PMCB, Recloser, LBS dll) Kalbar
- c. Meminta data operasi dan pengusaha pada penyulang di gardu induk Kalbar.
- d. Menolak permintaan yang tidak sesuai dengan garis wewenang operasi atau secara teknis diluar kemampuan sistem.
- e. Melaksanakan tugas sesuai dengan hirarki dan garis kewenangan operasi.

2.1.13. Operator Pembangkit Sistem Khatulistiwa

Bertugas mengoperasikan unit pembangkit sesuai dengan kemampuan peralatan atas perintah Dispatcher.

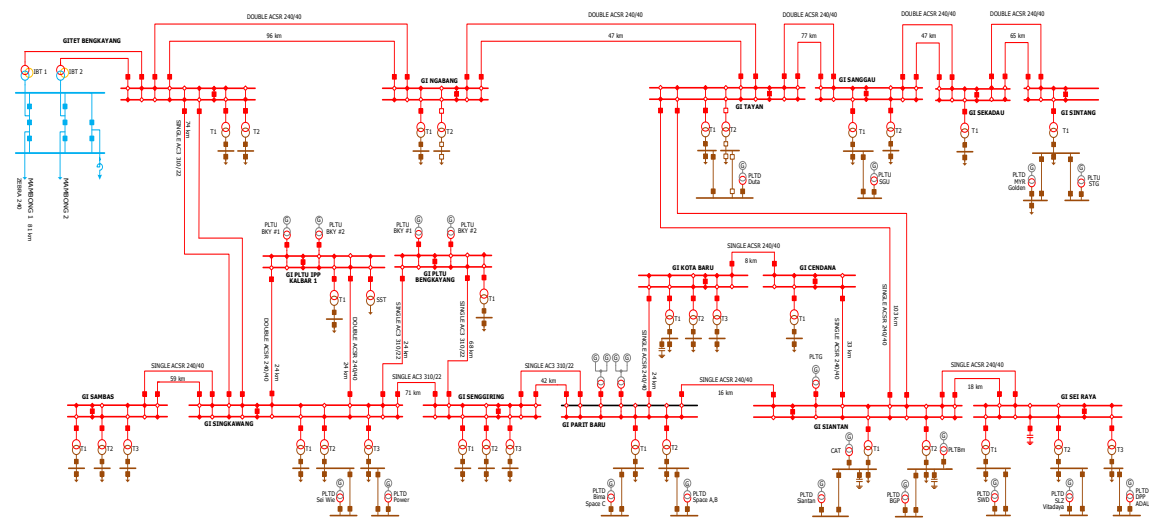
Kewenangan Batasan Operasi Sistem untuk:

- a. Mengoperasikan unit pembangkit berdasarkan perintah /pola yang ditetapkan Dispatcher.
- b. Mengoperasikan unit pembangkit pada kondisi pengujian tanpa masuk sistem (Running Test).
- c. Menghentikan (emergency stop) unit pembangkit yang beroperasi bila terjadi gangguan atau pada kondisi darurat.
- d. Berkoordinasi dengan ULTG agar membuka PMT transmisi untuk menghentikan (emergency stop) unit pembangkit dari sistem jika emergency stop oleh Operator pembangkit gagal.

Menolak permintaan yang tidak sesuai dengan garis wewenang operasi atau secara teknis diluar kemampuan peralatan unit pembangkit

2.1.14. Sistem Khatulistiwa

Sistem Khatulistiwa meliputi Kota Pontianak, Singkawang, dan beberapa Kabupaten di Wilayah Kalimantan Barat. Pada tanggal 20 Januari 2016 Sistem Khatulistiwa interkoneksi dengan Sistem Sarawak (SEB) melalui jaringan transmisi tegangan 275 kV yang menghubungkan GITET Bengkayang di Kalimantan Barat dengan Subsistem Mambong di Sarawak. Sistem Khatulistiwa mendapatkan suplai energi dari beberapa sumber pembangkit antara lain hydro yang berasal dari interkoneksi dengan SEB (Serawak, Malaysia), pembangkit batu bara, pembangkit biomassa, dan pembangkit solar.



Gambar 2. 15 Single Line Diagram Sistem Khatulistiwa

2.1.15. DIgSILENT

Digital Simulation and Electrical NeTwork (DIgSILENT) merupakan perangkat lunak yang dikembangkan oleh perusahaan asal Jerman yang berguna untuk menganalisa dan melakukan perencanaan sistem tenaga listrik[18]. Nilai akurasi dan validitas dari hasil simulasi yang didapat telah terkonfirmasi dalam jumlah besar dan diterapkan beberapa perusahaan yang memerlukan perencanaan pada operasi sistem tenaga. Beberapa fitur dari aplikasi ini antara lain:

1. Fungsi inti PowerFactory: Definisi, modifikasi dan organisasi kasus, rutinitas numerik inti, dan fungsi dokumentasi output.
2. Garis grafis dan data penanganan kasus tunggal interaktif terpadu.
3. Elemen daya sistem dan database pada studi kasus-kasus dasar.
4. Fungsi perhitungan terintegrasi (misalnya garis dan perhitungan parameter mesin berdasarkan informasi geometris atau papan nama/nameplate).
5. Sistem tenaga konfigurasi jaringan dengan akses interaktif atau terhubung/online ke sistem SCADA.
6. Interface yang generik untuk sistem pemetaan dengan komputer.

DIgSILENT PowerFactory dipilih karena memiliki modul RMAC/Restoration Analysis yang secara khusus dapat mensimulasikan skenario blackstart, islanding, dan line energization. Pada penelitian ini, tahapan blackstart terlebih dahulu diuji dan divalidasi melalui simulasi pada perangkat lunak DIgSILENT sebelum dibandingkan dengan hasil pengujian aktual di lapangan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui respon sistem terhadap pembentukan tegangan awal, kestabilan frekuensi, serta kemampuan unit dalam menopang pembebanan awal secara bertahap. Selain itu, perhitungan arus inrush, profil tegangan pasca charging, serta alur restorasi jaringan 150 kV dapat dimodelkan dengan akurasi tinggi. DIgSILENT juga digunakan oleh PLN UIP3B Kalimantan sebagai tools resmi analisis sistem, sehingga hasil simulasi lebih sesuai dengan standar operasi yang berlaku.[19]

Selain digunakan untuk simulasi blackstart, pemilihan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory dalam penelitian ini juga didasarkan pada kemampuannya dalam menganalisis fenomena line charging secara detail dan komprehensif. Pada proses energisasi saluran transmisi 150 kV, terutama dalam kondisi tanpa beban, efek kapasitansi saluran menjadi dominan dan dapat menyebabkan kenaikan tegangan (overvoltage) pada ujung saluran. Fenomena ini sangat penting untuk dikaji karena berpotensi mengganggu kestabilan sistem serta memicu kerja proteksi yang tidak diinginkan.

DIgSILENT memiliki kemampuan untuk memodelkan parameter saluran transmisi secara rinci, meliputi resistansi, induktansi, dan kapasitansi, sehingga respon tegangan selama line charging dapat dianalisis secara akurat. Perangkat lunak ini juga memungkinkan simulasi kondisi sistem dalam berbagai skenario, seperti tanpa beban, beban ringan, maupun perubahan konfigurasi jaringan. Hal ini sangat penting dalam proses pemulihan sistem tenaga listrik, di mana kondisi operasi berbeda dari kondisi normal.

Selain itu, DIgSILENT menyediakan fitur analisis transient dan RMS simulation yang mampu menggambarkan respon dinamis tegangan dan frekuensi selama proses energisasi jaringan. Dengan fitur ini, perubahan tegangan akibat efek Ferranti, lonjakan arus pengisian, serta stabilitas daya reaktif dapat diamati secara real time dalam simulasi. Hal ini memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai batas operasi aman selama line charging dan membantu operator dalam menyusun strategi mitigasi risiko overvoltage.

Keunggulan lainnya adalah kemampuan DIgSILENT dalam melakukan koordinasi antara pembangkit, transformator, dan sistem transmisi dalam satu model terpadu. Dengan demikian, pengaruh line charging terhadap kestabilan frekuensi, daya reaktif generator, serta profil tegangan sistem dapat dianalisis secara menyeluruh. Hasil simulasi ini kemudian dibandingkan dengan data aktual pengujian di lapangan untuk mengevaluasi kesesuaian model dan meningkatkan keandalan strategi pemulihan Sistem Khatulistiwa.

Dengan berbagai kemampuan tersebut, DIgSILENT PowerFactory menjadi perangkat yang sangat sesuai untuk mendukung analisis teknis pada penelitian ini, khususnya dalam memahami karakteristik line charging, menjaga kestabilan tegangan, serta memastikan keberhasilan proses pemulihan sistem tenaga listrik pasca blackout.

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini penulis melakukan tinjauan literatur pada beberapa penelitian yang relevan untuk dijadikan referensi. Referensi dapat berasal dari jurnal, artikel, skripsi, atau buku yang relevan. Beberapa referensi yang penulis dapatkan sebagai berikut :

1. I. Hajar, N. Pasra, dan D. Rusmansyah [14] dalam penelitiannya berjudul “*Analisis Voltage Drop Pada Jaringan Tegangan Rendah Dengan Metode Pecah Beban Pada Gardu KH 007 di PT PLN (Persero) UP3 Pamekasan*” menganalisis penurunan tegangan pada jaringan distribusi tegangan rendah akibat pembebanan yang tidak merata dan panjang penghantar, dengan tujuan meningkatkan kualitas tegangan pelanggan. Metode yang digunakan adalah pecah beban, yaitu redistribusi beban antar penyulang atau gardu untuk menurunkan arus dan rugi tegangan pada jaringan, di mana hasil penelitian menunjukkan bahwa metode tersebut mampu memperbaiki profil tegangan hingga memenuhi standar pelayanan. Persamaan penelitian ini dengan Tugas Akhir yang dilakukan adalah sama-sama membahas keandalan sistem tenaga listrik PLN serta menganalisis parameter tegangan berdasarkan data operasional lapangan. Adapun perbedaannya terletak pada ruang lingkup dan fokus kajian, di mana penelitian Hajar *et al.* berfokus pada jaringan distribusi tegangan rendah dan perbaikan kualitas tegangan pelanggan, sedangkan penelitian ini berfokus pada sistem transmisi dan pembangkitan, khususnya pengujian blackstart PLTG dan line charging jaringan 150 kV dalam mempercepat pemulihan Sistem Khatulistiwa pasca blackout.
2. M. Hassan *et al.* [3] dalam penelitiannya berjudul “*Analisa Sistem Kerja Black Start pada Generator Emergency 1.008 kW di PT Sewatama Sumbagut 2 Peaker Powerplant 250 MW*” membahas mekanisme kerja sistem blackstart pada generator emergency sebagai sumber daya awal untuk menghidupkan sistem bantu pembangkit pada kondisi blackout. Penelitian ini menganalisis tahapan start awal generator emergency, kestabilan suplai daya awal, serta perannya dalam mendukung kesiapan pembangkit utama untuk beroperasi kembali. Persamaan penelitian ini dengan Tugas Akhir yang dilakukan adalah sama-sama mengkaji konsep dan peranan blackstart sebagai bagian penting dalam pemulihan sistem tenaga listrik pasca gangguan menyeluruh. Adapun perbedaannya terletak pada objek dan cakupan penelitian, di mana penelitian Hassan *et al.* berfokus pada blackstart generator emergency pada level internal pembangkit, sedangkan penelitian ini berfokus pada pengujian

blackstart PLTG dan proses line charging jaringan transmisi 150 kV sebagai bagian dari pemulihan sistem interkoneksi Sistem Khatulistiwa secara menyeluruh.

3. M. Eidiani, H. Zeynal, dan Z. Zakaria [18] dalam penelitiannya berjudul “*A Comprehensive Study on the Renewable Energy Integration Using DIgSILENT*” membahas pemanfaatan perangkat lunak DIgSILENT PowerFactory dalam menganalisis integrasi pembangkit energi terbarukan ke dalam sistem tenaga listrik, dengan fokus pada evaluasi aliran daya, kestabilan tegangan, dan respon sistem terhadap perubahan konfigurasi jaringan. Penelitian ini menunjukkan bahwa DIgSILENT memiliki tingkat akurasi yang tinggi dalam memodelkan kondisi operasi sistem tenaga listrik dan sangat efektif digunakan sebagai alat bantu analisis perencanaan dan operasi sistem. Persamaan penelitian ini dengan Tugas Akhir yang dilakukan adalah sama-sama menggunakan DIgSILENT PowerFactory sebagai alat analisis sistem tenaga listrik berbasis simulasi. Adapun perbedaannya terletak pada fokus kajian, di mana penelitian Eidiani *et al.* menitikberatkan pada integrasi energi terbarukan dan perencanaan sistem, sedangkan penelitian ini berfokus pada simulasi dan analisis pengujian blackstart serta line charging jaringan transmisi 150 kV dalam proses pemulihan Sistem Khatulistiwa pasca blackout.
4. I. Hajar dan K. Ramadhanti [15] dalam penelitiannya berjudul “*Kajian Perbaikan Tegangan Menggunakan Kapasitor Bank di PT Panca Agung Sejati*” membahas upaya peningkatan kualitas tegangan pada sistem distribusi melalui pemasangan kapasitor bank untuk memperbaiki faktor daya dan menurunkan rugi-rugi daya reaktif. Penelitian ini menganalisis kondisi tegangan sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank serta menunjukkan bahwa kompensasi daya reaktif mampu meningkatkan profil tegangan hingga berada dalam batas standar operasi yang diizinkan. Persamaan penelitian ini dengan Tugas Akhir yang dilakukan adalah sama-sama mengkaji perbaikan kualitas tegangan dan keandalan sistem tenaga listrik berdasarkan analisis teknis data operasional. Adapun perbedaannya terletak pada ruang lingkup dan tujuan penelitian, di mana penelitian Hajar dan Ramadhanti berfokus pada peningkatan kualitas tegangan pada sisi distribusi melalui kompensasi

daya reaktif, sedangkan penelitian ini berfokus pada pemulihan sistem tenaga listrik pasca blackout melalui pengujian blackstart PLTG dan line charging jaringan transmisi 150 kV pada Sistem Khatulistiwa.

5. M. H. Ridho, W. P. Muljanto, dan N. P. Agustini [16] dalam penelitiannya berjudul *“Studi Kapabilitas pada Perencanaan Black Start Gas Turbine Generator 2.1 PT Indonesia Power Grati POMU”* membahas analisis kemampuan unit gas turbine generator dalam mendukung skenario blackstart, meliputi kesiapan sistem bantu, kapasitas daya awal, serta batasan teknis pembangkitan pada tahap awal pemulihan sistem. Penelitian ini menekankan pentingnya perencanaan blackstart yang matang agar pembangkit mampu beroperasi stabil pada kondisi beban awal yang terbatas. Persamaan penelitian ini dengan Tugas Akhir yang dilakukan adalah sama-sama mengkaji blackstart pada pembangkit listrik tenaga gas sebagai bagian dari strategi pemulihan sistem tenaga listrik pasca blackout. Adapun perbedaannya terletak pada fokus kajian, di mana penelitian Ridho *et al.* berorientasi pada aspek perencanaan dan kapabilitas unit pembangkit secara internal, sedangkan penelitian ini berfokus pada pengujian operasional blackstart yang terintegrasi dengan proses line charging jaringan transmisi 150 kV dalam pemulihan Sistem Khatulistiwa secara menyeluruh.

Tabel 2. 2 Penelitian Yang Relevan

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Fokus Penelitian	Metode/Alat	Persamaan dengan Penelitian Ini	Perbedaan dengan Penelitian Ini
1	I. Hajar, N. Pasra, D. Rusmansyah (2020)	Analisis Voltage Drop Pada Jaringan Tegangan Rendah Dengan Metode Pecah Beban	Analisis penurunan tegangan pada jaringan distribusi tegangan rendah	Metode pecah beban, analisis data jaringan	Sama-sama membahas keandalan sistem tenaga listrik dan analisis tegangan berbasis data lapangan	Fokus pada distribusi tegangan rendah, sedangkan penelitian ini fokus pada transmisi, pembangkitan, blackstart, dan line charging 150 kV
2	M. Hassan et al. (2023)	Analisa Sistem Kerja Black Start pada Generator Emergency 1.008 kW	Sistem kerja blackstart generator emergency pada pembangkit	Analisis tahapan start dan kestabilan daya awal	Sama-sama membahas blackstart sebagai metode pemulihan sistem pasca blackout	Terbatas pada generator emergency internal pembangkit, sedangkan penelitian ini mencakup blackstart PLTG dan pemulihan sistem interkoneksi

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Fokus Penelitian	Metode/Alat	Persamaan dengan Penelitian Ini	Perbedaan dengan Penelitian Ini
3	M. Eidiani, H. Zeynal, Z. Zakaria (2023)	A Comprehensive Study on the Renewable Energy Integration Using DIgSILENT	Analisis sistem tenaga listrik menggunakan DIgSILENT PowerFactory	Simulasi aliran daya dan stabilitas sistem	Sama-sama menggunakan DIgSILENT PowerFactory sebagai alat analisis sistem	Fokus pada integrasi energi terbarukan dan perencanaan sistem, sedangkan penelitian ini fokus pada simulasi blackstart dan line charging
4	I. Hajar & K. Ramadhanti (2022)	Kajian Perbaikan Tegangan Menggunakan Kapasitor Bank	Peningkatan kualitas tegangan melalui kompensasi daya reaktif	Analisis sebelum dan sesudah pemasangan kapasitor bank	Sama-sama mengkaji kualitas tegangan dan keandalan sistem	Fokus pada distribusi dan kompensasi daya reaktif, sedangkan penelitian ini fokus pada pemulihan sistem pasca blackout

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Fokus Penelitian	Metode/Alat	Persamaan dengan Penelitian Ini	Perbedaan dengan Penelitian Ini
5	M. H. Ridho, W. P. Muljanto, N. P. Agustini (2024)	Studi Kapabilitas pada Perencanaan Black Start Gas Turbine Generator	Analisis kapabilitas unit GTG untuk blackstart	Studi perencanaan dan analisis teknis unit pembangkit	Sama-sama membahas blackstart pada pembangkit listrik tenaga gas	Fokus pada perencanaan internal unit pembangkit, sedangkan penelitian ini menekankan pengujian operasional blackstart dan line charging jaringan 150 kV

2.3 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini disusun untuk memberikan gambaran alur berpikir penulis dalam menganalisis permasalahan yang terjadi pada Sistem Interkoneksi Khatulistiwa. Permasalahan utama yang menjadi fokus adalah terjadinya gangguan yang diakibatkan dari naiknya aliran daya yang disebabkan trip ruas transmisi atau pembangkit yang berdampak pada kestabilan dan keandalan pasokan listrik. Melalui kerangka ini, ditunjukkan hubungan antara kondisi eksisting sistem, faktor penyebab gangguan, dampak yang ditimbulkan, serta langkah analisis yang dilakukan guna memperoleh solusi dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik.



Gambar 2. 16 Kerangka Pemikiran

Kerangka pemikiran penelitian ini diawali dari terjadinya gangguan sistem tenaga listrik atau blackout yang menyebabkan seluruh atau sebagian Sistem Khatulistiwa kehilangan suplai tegangan. Kondisi ini berdampak langsung pada penurunan keandalan sistem, ditandai dengan terhentinya penyaluran energi listrik ke pusat-pusat beban serta terganggunya stabilitas tegangan dan frekuensi sistem.

Akibat kondisi tersebut, muncul kebutuhan akan proses pemulihan sistem yang cepat dan andal agar pasokan listrik dapat segera dikembalikan dan dampak gangguan dapat diminimalkan. Salah satu strategi utama dalam pemulihan sistem pasca blackout adalah

penerapan blackstart, yaitu kemampuan pembangkit untuk melakukan start awal tanpa pasokan listrik dari sistem eksternal.

Dalam penelitian ini, PLTG MPP Parit Baru Blok 2 Unit 4 berperan sebagai sumber blackstart. Setelah pembangkit berhasil menghasilkan tegangan dan daya awal secara mandiri, proses pemulihan dilanjutkan dengan energizing gardu induk dan jaringan transmisi. Tahapan ini dilakukan melalui line charging jaringan transmisi 150 kV Parit Baru – Senggiring 2, yang harus dilaksanakan secara bertahap dan terkontrol untuk menghindari terjadinya overtegangan akibat efek kapasitansi saluran.

Setelah jaringan transmisi berhasil dienergize, proses pemulihan sistem dilanjutkan dengan penyambungan beban secara bertahap, baik melalui gardu induk maupun feeder 20 kV. Penyambungan beban dilakukan secara selektif agar keseimbangan antara daya pembangkitan dan daya beban tetap terjaga sehingga kestabilan tegangan dan frekuensi sistem dapat dipertahankan.

Seluruh rangkaian proses blackstart dan line charging tersebut menghasilkan data pengujian operasional, seperti profil tegangan, frekuensi, dan waktu pemulihan sistem. Data ini kemudian dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas skenario pemulihan sistem yang diterapkan. Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam menyusun rekomendasi strategi pemulihan dan mitigasi gangguan guna meningkatkan keandalan dan ketahanan Sistem Khatulistiwa terhadap gangguan serupa di masa mendatang.