

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT PLN ULTG Ketapang merupakan Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk yang mengelola sistem penyaluran tenaga listrik di wilayah Kalimantan Barat, meliputi Ketapang, Kayong Utara, Kendawangan, dan Sandai. Sistem transmisi pada wilayah ini terdiri dari empat Gardu Induk (GI) 150 kV, yaitu GI Ketapang, GI Sukadana, GI Kendawangan, dan GI Sandai, yang saling terhubung melalui jaringan Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV.

Salah satu jalur transmisi utama pada sistem ini adalah saluran 150 kV Ketapang – Sukadana – Sandai yang memiliki konfigurasi *single line connection*. Dalam konfigurasi tersebut, GI Sandai terhubung ke sistem melalui dua saluran transmisi, yaitu Sandai – Ketapang dan Sandai – Sukadana. Kondisi ini menyebabkan kontinuitas penyaluran daya di GI Sandai sangat bergantung pada keandalan kedua saluran tersebut.

Pada kondisi gangguan dua saluran secara bersamaan (contingency N-2) pada saluran Sandai – Ketapang dan Sandai – Sukadana, GI Sandai dapat mengalami kehilangan suplai tegangan secara keseluruhan sehingga berada dalam kondisi padam (*dead bus*). Hilangnya tegangan pada sisi *busbar* ini menyebabkan sistem di GI Sandai terisolasi dari sumber tegangan utama, yang berpotensi mengganggu kontinuitas penyaluran daya ke beban serta menurunkan tingkat keandalan sistem transmisi secara keseluruhan.

Sebagian besar gangguan pada saluran transmisi udara bersifat sementara (*transient fault*), seperti akibat sambaran petir, pohon yang menyentuh konduktor, atau gangguan eksternal lainnya. Oleh karena itu, penerapan skema proteksi *autoreclose* diperlukan untuk memungkinkan pemulihan sistem secara otomatis setelah gangguan hilang. Namun, pada kondisi *dead bus*, proses penutupan kembali pemutus tenaga (PMT) tidak dapat dilakukan secara langsung tanpa melalui pemeriksaan kondisi sinkronisasi sistem.

Apabila proses *autoreclose* dilakukan tanpa mempertimbangkan kondisi sinkronisasi antara sisi saluran dan *busbar*, maka penutupan PMT berpotensi menimbulkan arus transien yang besar, ketidakstabilan sistem, serta kerusakan pada peralatan gardu induk. Oleh karena itu, diperlukan koordinasi antara skema *autoreclose* dengan fungsi *relay check synchronism* untuk memastikan bahwa proses penormalan sistem pasca gangguan dapat dilakukan secara aman.

Pada implementasinya di GI Sandai, fungsi pemeriksaan sinkronisasi tersebut dijalankan oleh *relay check synchronism* ANSI 25 pada *relay* NR Electric PCS-931. Pada kondisi gangguan N-2 yang menyebabkan salah satu sisi sistem berada dalam kondisi *live line-dead bus*, *relay* akan memblok perintah penutupan kembali PMT karena parameter sinkronisasi tidak dapat terpenuhi. Akibatnya, meskipun gangguan yang terjadi bersifat sementara dan waktu *dead time autoreclose* telah terpenuhi, proses penormalan sistem tidak dapat dilakukan secara otomatis.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian mengenai analisis dan evaluasi skema proteksi *autoreclose* pada jaringan *single line connection* saluran transmisi 150 kV Ketapang – Sukadana – Sandai menjadi penting untuk dilakukan, khususnya dalam menghadapi kondisi gangguan N-2 yang menyebabkan GI Sandai berada pada kondisi *dead bus*. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan rekomendasi pengaturan proteksi yang optimal guna meningkatkan keandalan, kontinuitas, dan stabilitas sistem tenaga listrik di wilayah kerja ULTG Ketapang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang tersebut, maka rumusan masalah yang menjadi fokus dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kinerja *relay check synchronism* pada skema *autoreclose* jaringan *single line connection* transmisi 150 kV Ketapang–Sukadana–Sandai saat terjadi gangguan?
2. Bagaimana pengaruh konfigurasi *setting* mode sinkron terhadap keberhasilan *autoreclose* pada kondisi gangguan N-2 yang menyebabkan GI Sandai padam?

3. Bagaimana tingkat keandalan sistem transmisi 150 kV Ketapang–Sukadana–Sandai berdasarkan indikator keandalan setelah penerapan rekomendasi *setting*?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui bagaimana kondisi awal skema proteksi *autoreclose* jaringan transmisi 150 kV Ketapang – Sukadana – Sandai.
2. Mengetahui penyebab gagalnya skema proteksi *autoreclose* jaringan transmisi 150 kV Ketapang – Sukadana – Sandai.
3. Mengetahui pengaruh skema proteksi *autoreclose* terhadap keandalan sistem transmisi 150 kV PLN ULTG Ketapang.

1.4 Manfaat

Dengan dilakukannya penelitian ini, manfaat yang di dapatkan sebagai berikut:

1. Dapat membantu mengurangi durasi dan frekuensi padam akibat gangguan sementara, sehingga meningkatkan kontinuitas penyaluran daya listrik.
2. Dengan adanya penelitian yang saya lakukan ini dapat menjadi bahan referensi dan kajian ilmiah mengenai penerapan dan evaluasi skema *autoreclose* pada jaringan transmisi 150 kV dengan konfigurasi *single line connection*.
3. Menjadi dasar untuk penelitian lanjutan terkait integrasi *autoreclose* dengan teknologi proteksi modern, seperti digital *relay* dan SCADA.
4. Secara tidak langsung meningkatkan keandalan pasokan listrik yang diterima pelanggan, sehingga mendukung aktivitas ekonomi dan sosial di wilayah Ketapang, Sukadana, dan Sandai.

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, untuk mendapat hasil yang diharapkan maka penulis membatasi pembahasan dengan membuat ruang lingkup masalah sebagai berikut :

1. Penelitian ini dilakukan hanya saat terjadinya gangguan sementara (*transient fault*) seperti hubung singkat akibat petir, pohon menyentuh konduktor, atau hewan.
2. Mengamati dampak *autoreclose* terhadap keandalan sistem (durasi padam, frekuensi padam, serta stabilitas sistem transmisi).
3. Penelitian dibatasi pada analisis dan simulasi proteksi (studi kasus + software simulasi jika digunakan). Tidak mencakup perhitungan teknis detail peralatan (misalnya rating pemutus daya, arus hubung singkat detail), kecuali yang relevan dengan *setting* proteksi.

BAB II

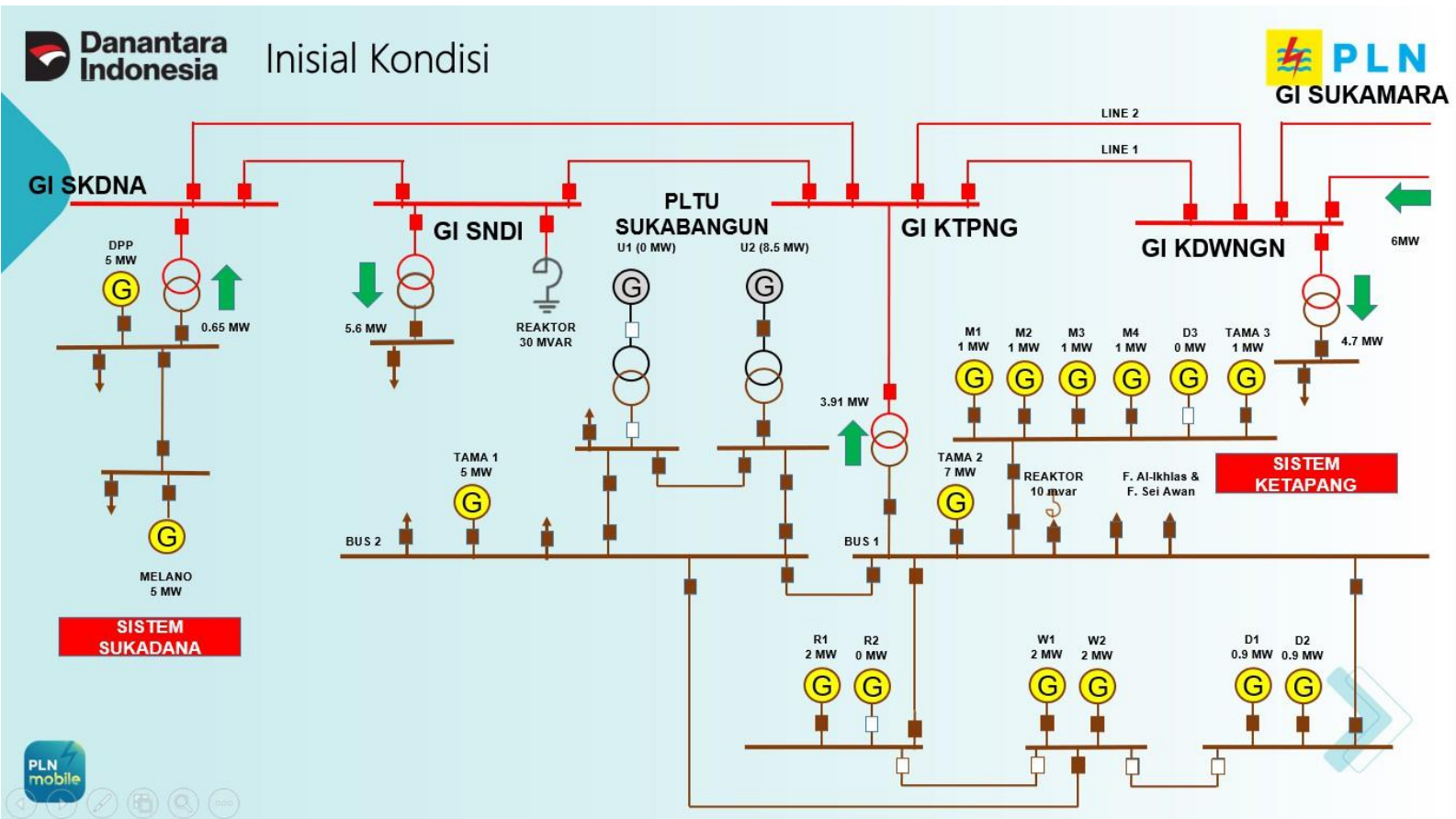
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Sistem Proteksi Tenaga Listrik

Sistem proteksi tenaga listrik merupakan sistem yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengisolasi bagian jaringan listrik yang mengalami gangguan. Selain itu, sistem proteksi berperan penting dalam menjaga keandalan serta mengamankan peralatan listrik dari kerusakan yang disebabkan oleh gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, maupun faktor lainnya. Setiap sistem tenaga listrik, seperti jaringan *distribusi*, transformator tenaga, sistem transmisi, maupun generator, dilengkapi dengan perangkat proteksi untuk mencegah kerusakan akibat gangguan atau beban lebih. Mekanisme proteksi bekerja dengan memutus atau memisahkan bagian jaringan yang mengalami gangguan, sehingga bagian sistem tenaga listrik lainnya yang tidak terdampak tetap dapat beroperasi dan menyalurkan energi listrik kepada konsumen secara normal. Sistem proteksi memiliki tiga tahapan prinsip kerja utama, yaitu mendeteksi gangguan, mengisolasi bagian yang mengalami gangguan dan pemulihan sistem.

Jenis-jenis gangguan pada sistem tenaga listrik pada umumnya dapat dibedakan menjadi dua, yang pertama yaitu gangguan sementara (*temporary fault*) yang biasanya disebabkan oleh petir, dahan atau ranting pohon yang menyentuh konduktor dan dapat hilang dalam waktu singkat. Kemudian untuk jenis gangguan selanjutnya adalah gangguan permanen (*permanent fault*) yang biasanya disebabkan oleh kerusakan pada peralatan atau konduktor putus sehingga memerlukan tindakan perbaikan manual oleh petugas. Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) memiliki potensi besar mengalami gangguan transmisi, yang sebagian besar biasanya bersifat sementara atau temporer. Agar kontinuitas penyaluran tenaga listrik ke konsumen tetap terjaga maka PMT dapat dicoba untuk masuk kembali sesaat setelah terjadinya *trip (autoreclose)*, dan apabila masih terdapat gangguan pada saluran tersebut PMT dalam kondisi siap untuk *trip* atau memutus kembali.



Gambar 2. 1 Single Line Diagram ULTG Ketapang

2.1.2 Komponen Sistem Proteksi

Suatu sistem tenaga listrik harus dilengkapi dengan adanya sistem proteksi, baik itu proteksi pada penghantar maupun proteksi pembangkitan. Proteksi Penghantar sistem tenaga listrik merupakan suatu sistem yang berfungsi untuk mengamankan saluran udara atau saluran kabel sistem tenaga listrik dari temporary *fault* maupun permanent *fault* pada saluran penghantar tersebut.

Komponen sistem proteksi tenaga listrik khususnya pada Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) terdiri dari beberapa peralatan listrik yang digunakan dan memiliki fungsinya masing-masing demi keandalan sistem tenaga listrik tersebut. Komponen-komponen sistem proteksi tenaga listrik tersebut meliputi :

1. Saluran Transmisi

Secara umum, saluran transmisi merupakan bagian dari sistem tenaga listrik yang berfungsi menyalurkan daya listrik dari pusat pembangkit ke gardu induk, maupun dari satu gardu induk ke gardu induk lainnya. Saluran transmisi diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) dan Saluran Kabel Tegangan Tinggi (SKTT). Komponen utama saluran transmisi meliputi konduktor, isolator, serta menara atau tiang penyangga yang berfungsi untuk menopang dan menjaga keamanan jalur penghantar listrik.

2. Current Transformer (CT)

Current Transformer (CT) atau transformator arus berfungsi untuk menurunkan arus bolak-balik yang besar menjadi arus bolak-balik dengan nilai lebih kecil, sehingga dapat digunakan dengan aman oleh peralatan pengukuran maupun relai proteksi.

3. Voltage Transformer (VT/CVT)

Voltage Transformer (VT) atau Potential Transformer (PT) merupakan transformator yang berfungsi menurunkan tegangan tinggi pada sistem tenaga listrik menjadi tegangan yang lebih rendah, sehingga aman digunakan untuk keperluan pengukuran dan sistem proteksi. Secara umum prinsip kerja dari Voltage

Transformer (VT) atau Potensial Transformer (PT) sama dengan prinsip kerja pada Current Transformer (CT).

4. Pemutus (PMT)

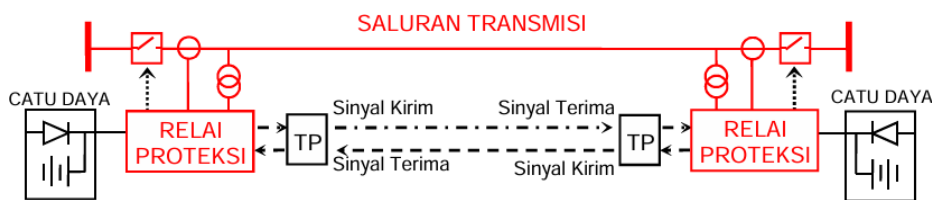
Pemutus Tenaga (PMT) atau Circuit Breaker (CB) merupakan saklar yang digunakan untuk memutus atau menghubungkan arus listrik dalam kondisi normal maupun gangguan.

5. Teleproteksi

Teleproteksi merupakan suatu rangkaian peralatan sistem komunikasi antar gardu induk yang berfungsi untuk mempercepat koordinasi kerja relai proteksi dalam mengirim dan menerima sinyal perintah *trip* atau blokir secara cepat.

6. Catu Daya Rangkaian Pengawatan (Wiring)

Catu daya rangkaian pengawatan merupakan peralatan listrik berupa baterai yang berfungsi sebagai sumber energi untuk mengoperasikan peralatan utama, khususnya dalam memberikan perintah *trip*. *Relay* statik maupun *relay* bantu pada sistem proteksi dirangkai sedemikian rupa sehingga membentuk satu kesatuan rangkaian pengawatan (wiring) yang berperan dalam memastikan proses proteksi berjalan dengan andal.

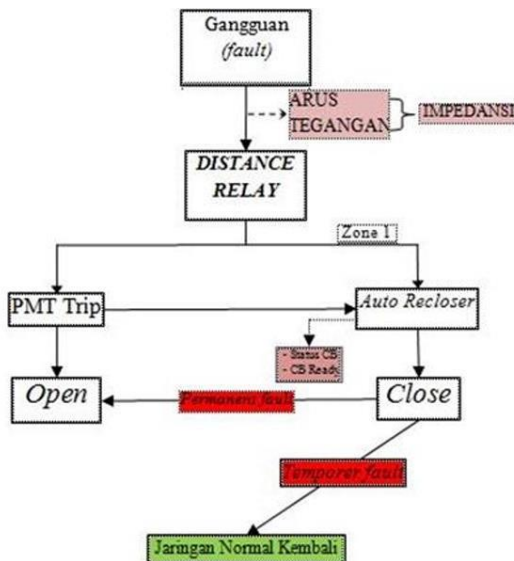


Gambar 2. 2 Typical Komponen Sistem Proteksi SUTT

2.1.3 Autoreclose Relay

Autoreclose Relay merupakan suatu perangkat *relay* yang memiliki fungsi untuk memberikan perintah menutup kembali (reclose) ke PMT setelah terjadinya *trip*. Apabila pada sistem tenaga listrik terjadi gangguan yang bersifat sementara (*temporary fault*) maka posisi

terakhir PMT adalah posisi tertutup (close) dan sistem tenaga listrik yang terjadi gangguan kembali normal. Hal ini dikarenakan *autoreclose* memiliki tujuan utama yaitu untuk meningkatkan kontinuitas penyaluran sistem tenaga listrik. Namun jika gangguannya bersifat permanen maka AR yang telah memberikan perintah close kepada PMT setelah *trip*, PMT tersebut akan ditripkan kembali oleh proteksi utama.



Gambar 2. 3 Prinsip Kerja Autoreclose

Autoreclose relay dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bagian berdasarkan jumlah operasi, kecepatan kerja, serta konfigurasi sistem jaringan.

1. Berdasarkan Jumlah Operasi

- a. Single-Shot *Autoreclose*

Yang dimaksud dari single-shot *autoreclose* adalah jenis *autoreclose* yang hanya melakukan satu kali penutupan ulang setelah adanya gangguan yang terdeteksi dan PMT kembali dalam posisi open.

- b. Multi-Shot *Autoreclose*

Perbedaan dari multi-shot *autoreclose* dan single-shot *autoreclose* adalah multi-shot *autoreclose* dapat melakukan percobaan penutupan ulang PMT lebih dari satu kali.

2. Berdasarkan Kecepatan Operasi (*Dead Time*)

a. High-Speed *Autoreclose* (HSAR)

High-Speed *Autoreclose* (HSAR) adalah penutup balik otomatis yang bekerja dengan waktu *dead time* yang sangat singkat, umumnya bekerja sekitar 0,3 – 1 detik.

b. Delayed *Autoreclose* (DAR)

Delayed *Autoreclose* (DAR) merupakan penutup balik otomatis yang bekerja dengan waktu *dead time* yang lebih lambat, umumnya bekerja lebih dari 1 detik atau sekitar 2-10 detik.

3. Berdasarkan Jumlah Fasa

a. Satu Fasa (Single Phase)

Single Phase *Auto Reclose* (SPAR) adalah kondisi ketika terjadi gangguan pada salah satu fasa penghantar, sehingga PMT (Pemutus Tenaga) membuka pada fasa tersebut dan kemudian menutup kembali secara otomatis hanya pada fasa yang mengalami gangguan.

b. Tiga Fasa (Three Phase)

Three Phase *Auto Reclose* (TPAR) adalah kondisi ketika satu atau lebih fasa pada penghantar mengalami gangguan, sehingga PMT (Pemutus Tenaga) membuka ketiga fasa, kemudian menutup kembali secara bersamaan pada seluruh fasa setelah gangguan dinilai hilang.

Adanya *autoreclose relay* pada suatu sistem tenaga listrik memberikan beberapa manfaat terhadap sistem kelistrikan. Diantaranya yaitu meningkatkan keandalan sistem dengan berkurangnya durasi padam (SAIDI) dan frekuensi padam (SAIFI) akibat terjadinya gangguan sementara. Kemudian menjaga stabilitas sistem tenaga listrik, khususnya pada jaringan transmisi dan mengurangi kerugian energi akibat padam sementara. Namun demikian untuk mendapatkan kinerja efektifitas *autoreclose* yang maksimal, pengaturan

autoreclose juga harus lebih diperharikan supaya tidak menyebabkan gangguan berulang atau bahkan terjadinya kerusakan pada peralatan.

Terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam pengaturan *autoreclose* agar dapat bekerja secara optimal pada sistem tenaga listrik. Aspek pertama adalah koordinasi waktu antara relai utama, relai cadangan, dan reclose time. Selain itu, jenis gangguan serta kemampuan mekanik PMT untuk melakukan operasi buka–tutup cepat juga menjadi faktor penting. Kondisi sinkronisasi antar sistem pada masing-masing gardu induk turut perlu diperhatikan. Hal ini berkaitan dengan penggunaan relai cek sinkron, yaitu relai bantu pada bay penghantar yang digunakan pada sistem tenaga listrik dengan lebih dari satu sumber. Relai ini berfungsi memastikan bahwa kedua sisi (antar gardu induk) berada dalam kondisi sinkron sebelum PMT menutup kembali. Relai cek sinkron juga dilengkapi dengan fungsi pengawasan tegangan. Dalam operasionalnya, relai cek sinkron bekerja berdasarkan beberapa kondisi tegangan, antara lain:

Tabel 2. 1 Pola Operasional Relai Cek Sinkron

<i>Bus</i>	<i>Line</i>	Auto	Manual	By Pass
<i>Live</i>	<i>Live</i>	✓	✓	X
<i>Live</i>	<i>Dead</i>	✓	✓	✓
<i>Dead</i>	<i>Live</i>	✓	✓	✓
<i>Dead</i>	<i>Dead</i>	X	X	✓

2.1.4 Relay Check synchronism (ANSI 25)

Relai *check synchronism* (ANSI 25) merupakan perangkat proteksi yang berfungsi untuk memastikan bahwa kondisi sistem tenaga listrik telah memenuhi syarat sinkronisasi sebelum dilakukan penutupan pemutus tenaga (PMT). Penggunaan relai ini sangat penting pada sistem dengan lebih dari satu sumber tegangan atau konfigurasi jaringan tertentu untuk mencegah gangguan akibat penutupan PMT pada kondisi yang tidak sinkron.



Gambar 2. 4 Relay PCS-931 yang terpasang pada panel proteksi GI Sandai

Pada penelitian ini, fungsi *check synchronism* diimplementasikan menggunakan relay NR Electric PCS-931 yang terpasang pada Gardu Induk Sandai. Relay ini bekerja dengan membandingkan parameter listrik pada sisi saluran (*line*) dan sisi busbar (*bus*) sebelum memberikan izin penutupan PMT.

Parameter sinkronisasi yang dievaluasi meliputi:

1. Perbedaan Tegangan (ΔV)

Perbedaan tegangan antara sisi saluran dan sisi busbar harus berada dalam batas toleransi tertentu. Perbedaan tegangan yang terlalu besar dapat menyebabkan lonjakan arus sesaat (*inrush current*) saat PMT ditutup, yang berpotensi merusak peralatan sistem tenaga.

2. Perbedaan Frekuensi (Δf)

Frekuensi kedua sistem harus hampir sama. Apabila frekuensi berbeda signifikan, maka setelah PMT ditutup akan terjadi percepatan atau perlambatan sudut fasa yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem dan meningkatkan risiko pelepasan sinkron (*loss of synchronism*).

3. Perbedaan Sudut Fasa ($\Delta \phi$)

Sudut fasa antara tegangan pada sisi saluran dan busbar harus berada dalam batas sudut tertentu. Perbedaan sudut fasa yang besar dapat menyebabkan arus transien yang sangat tinggi pada saat penutupan PMT.

Apabila seluruh parameter berada dalam batas toleransi yang diizinkan, *relay* akan memberikan sinyal *permissive close* kepada PMT. Sebaliknya, apabila salah satu parameter berada di luar batas yang ditentukan, maka perintah penutupan PMT akan diblokir sebagai bentuk pengamanan sistem.

Relay check synchronism memiliki beberapa mode operasi yang disesuaikan dengan kondisi sistem pada saat proses penutupan PMT, yaitu:

1. *Live Line – Live Bus (LLLB)*

Mode ini digunakan ketika sisi saluran dan sisi *busbar* sama-sama dalam kondisi bertegangan. Pada kondisi ini, *relay* akan memeriksa seluruh parameter sinkronisasi, yaitu ΔV , Δf , dan $\Delta \phi$. Mode LLLB umumnya diterapkan pada sistem dengan dua sumber aktif yang akan dihubungkan secara paralel.

2. *Live Line – Dead bus (LLDB)*

Mode LLDB digunakan ketika sisi saluran dalam kondisi bertegangan (*live*), sedangkan sisi *busbar* dalam kondisi tidak bertegangan (*dead*). Pada kondisi ini, *relay check synchronism* berfungsi untuk memastikan bahwa *busbar* benar-benar dalam keadaan mati sebelum PMT ditutup. Mode LLDB banyak diterapkan pada proses *autoreclose* atau pemulihan sistem setelah gangguan, terutama pada sistem transmisi dengan konfigurasi *single line connection*.

3. *Dead Line – Dead bus (DLDB)*

Mode DLDB digunakan ketika baik sisi saluran maupun sisi *busbar* berada dalam kondisi tidak bertegangan. Pada kondisi ini, *relay* berfungsi sebagai pengaman untuk memastikan bahwa tidak terdapat tegangan sisa (*residual voltage*) sebelum PMT diizinkan untuk ditutup. Mode ini penting untuk mencegah kesalahan penutupan PMT akibat pembacaan tegangan semu.

Penerapan mode LLDB dan DLDB berperan penting dalam meningkatkan keandalan proses *autoreclose*, khususnya pada kondisi pasca gangguan yang menyebabkan salah satu sisi sistem berada dalam kondisi padam (*dead bus*). Pemeriksaan kondisi sinkronisasi oleh *relay* sebelum penutupan PMT bertujuan untuk mencegah terjadinya arus transien yang besar,

ketidakstabilan sistem, serta potensi kerusakan pada PMT dan peralatan sistem tenaga listrik lainnya.

Mode LLDB memastikan bahwa penutupan PMT hanya dilakukan ketika *busbar* benar-benar dalam kondisi mati, sehingga tegangan dari sisi saluran dapat disalurkan kembali tanpa menimbulkan gangguan transien yang berlebihan. Sementara itu, mode DLDB berperan sebagai pengaman tambahan untuk memastikan bahwa tidak terdapat tegangan sisa yang dapat membahayakan peralatan maupun personel.

Penggunaan LLDB dan DLDB juga berfungsi untuk mengurangi risiko kegagalan *autoreclose*, meningkatkan keandalan penyaluran tenaga listrik, serta meminimalkan kemungkinan terjadinya kerusakan pada PMT dan peralatan pendukung lainnya.

Penutupan PMT tanpa melalui pemeriksaan sinkronisasi yang memadai dapat menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap sistem tenaga listrik, antara lain:

- Terjadinya arus transien yang sangat besar
- Ketidakstabilan sistem tenaga
- Kerusakan mekanis dan termal pada PMT
- Penurunan umur peralatan sistem tenaga

2.1.5 Sistem Transmisi *Single line connection*

Sistem transmisi *single line connection* merupakan konfigurasi jaringan tenaga listrik yang menggunakan satu jalur penghantar untuk menyalurkan daya listrik antara dua gardu induk atau lebih. Pada konfigurasi ini, satu jalur transmisi berfungsi sebagai satu-satunya penghubung antar titik sistem, sehingga kontinuitas penyaluran daya sangat bergantung pada keandalan jalur tersebut.

Konfigurasi *single line connection* umumnya diterapkan pada sistem transmisi dengan keterbatasan infrastruktur, daerah dengan kepadatan beban yang relatif rendah, atau sebagai solusi sementara dalam pengembangan sistem tenaga listrik. Meskipun memiliki kelebihan dari sisi efisiensi biaya dan kesederhanaan konstruksi, sistem ini memiliki tingkat keandalan yang lebih rendah dibandingkan dengan konfigurasi *double circuit* atau sistem loop.

Beberapa karakteristik utama dari sistem transmisi *single line connection* antara lain:

1. Satu Jalur Penyaluran Daya

Seluruh aliran daya listrik disalurkan melalui satu jalur transmisi. Apabila terjadi gangguan pada jalur tersebut, maka suplai daya ke sisi beban dapat terputus secara keseluruhan.

2. Tidak Tersedianya Jalur Cadangan

Berbeda dengan sistem double circuit atau ring system, konfigurasi *single line connection* tidak memiliki jalur alternatif untuk menyalurkan daya apabila jalur utama mengalami gangguan.

3. Ketergantungan Tinggi terhadap Sistem Proteksi

Karena keterbatasan jalur, sistem proteksi dan pengamanan jaringan memegang peranan yang sangat penting dalam menjaga keandalan sistem secara keseluruhan.

4. Sensitivitas terhadap Gangguan

Gangguan satu titik pada sistem ini dapat menyebabkan pemadaman yang luas, terutama pada sistem dengan beban besar dan tidak memiliki sumber suplai alternatif.

Untuk memahami posisi sistem *single line connection* dalam sistem tenaga listrik, diperlukan perbandingan dengan konfigurasi jaringan lainnya. Secara umum, perbandingan karakteristik sistem transmisi dapat dilihat pada aspek keandalan, fleksibilitas operasi, dan biaya investasi.

Sistem *double circuit* menggunakan dua jalur transmisi paralel yang dapat saling mendukung apabila salah satu jalur mengalami gangguan. Sementara itu, sistem loop atau ring system memungkinkan penyaluran daya dari lebih dari satu arah, sehingga kontinuitas suplai daya dapat lebih terjamin.

Sebaliknya, sistem *single line connection* memiliki fleksibilitas operasi yang terbatas dan tingkat keandalan yang lebih rendah. Namun demikian, sistem ini tetap digunakan dengan pertimbangan efisiensi biaya serta kondisi geografis dan teknis tertentu.

Konfigurasi *single line connection* memiliki dampak signifikan terhadap keandalan sistem tenaga listrik. Ketika terjadi gangguan permanen pada jalur transmisi, proses pemulihan sistem menjadi lebih kompleks karena tidak adanya jalur alternatif untuk menyalurkan daya.

Pada kondisi tersebut, sistem proteksi harus mampu bekerja secara cepat dan selektif untuk meminimalkan area pemadaman. Selain itu, strategi pemulihan sistem seperti *autoreclose* dan pengaturan ulang konfigurasi jaringan menjadi sangat penting untuk mengembalikan suplai daya secepat mungkin.

Dalam sistem transmisi *single line connection*, sistem proteksi memiliki peran yang sangat krusial dalam menjaga kontinuitas dan keamanan penyaluran daya listrik. Proteksi yang tidak optimal dapat memperbesar dampak gangguan dan meningkatkan durasi pemadaman.

Penggunaan *relay* proteksi yang dilengkapi dengan fungsi *autoreclose* serta *check synchronism* (LLDB dan DLDB) menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan keandalan sistem. Dengan adanya pengamanan tersebut, penutupan PMT setelah gangguan dapat dilakukan secara aman dan terkendali, sehingga risiko kerusakan peralatan dan gangguan lanjutan dapat diminimalkan.

Penerapan LLDB dan DLDB pada sistem *single line connection* berfungsi untuk memastikan bahwa proses pemulihan sistem dilakukan pada kondisi yang aman secara elektrik, khususnya pada saat sistem hanya memiliki satu jalur penyaluran daya yang aktif.

Tabel 2. 2 Perbandingan Sistem Transmisi Single line connection dan Double Circuit

No	Aspek Perbandingan	<i>Single line connection</i>	<i>Double Circuit</i>
1	Jumlah Jalur Transmisi	Satu jalur transmisi	Dua jalur transmisi paralel
2	Keandalan Sistem	Relatif rendah karena tidak memiliki jalur cadangan	Lebih tinggi karena tersedia jalur cadangan
3	Kontinuitas Penyaluran Daya	Mudah mengalami pemadaman total saat terjadi gangguan	Penyaluran daya dapat tetap berlangsung melalui jalur lain
4	Fleksibilitas Operasi	Terbatas dalam pengaturan aliran daya	Lebih fleksibel dalam pengaturan dan pemeliharaan
5	Dampak Gangguan	Gangguan tunggal dapat menyebabkan pemadaman luas	Dampak gangguan lebih kecil dan terlokalisasi
6	Kebutuhan Sistem Proteksi	Sangat bergantung pada kecepatan dan keandalan proteksi	Proteksi berfungsi sebagai pengaman tambahan
7	Strategi Pemulihan Sistem	Mengandalkan <i>autoreclose</i> dan pengamanan sinkronisasi	Dapat dilakukan dengan pengalihan beban
8	Kompleksitas Sistem	Relatif sederhana	Lebih kompleks
9	Biaya Investasi	Lebih rendah	Lebih tinggi

10	Aplikasi Umum	Sistem transmisi dengan beban kecil atau keterbatasan infrastruktur	Sistem transmisi dengan beban besar dan kebutuhan keandalan tinggi
----	---------------	---	--

Berdasarkan Tabel Perbandingan Sistem Transmisi *Single line connection* dan Double Circuit, dapat diketahui bahwa sistem transmisi *single line connection* memiliki keunggulan pada aspek kesederhanaan dan efisiensi biaya, namun memiliki keterbatasan dari sisi keandalan dan fleksibilitas operasi. Ketika terjadi gangguan pada jalur transmisi, sistem ini sangat rentan terhadap pemadaman luas karena tidak memiliki jalur cadangan.

Sebaliknya, sistem double circuit menawarkan tingkat keandalan yang lebih tinggi karena adanya dua jalur transmisi yang dapat saling mendukung. Namun demikian, peningkatan keandalan tersebut harus diimbangi dengan biaya investasi dan kompleksitas sistem yang lebih besar.

Dalam konteks penelitian ini, sistem *single line connection* memerlukan penerapan sistem proteksi yang lebih andal, khususnya pada proses pemulihan sistem pasca gangguan. Oleh karena itu, penggunaan fungsi *check synchronism* dengan mode LLDB dan DLDB menjadi sangat penting untuk memastikan penutupan PMT dilakukan secara aman dan tidak menimbulkan gangguan lanjutan.

2.2. Penelitian yang Relevan

Pada penelitian ini, penulis melakukan tinjauan literatur terhadap berbagai penelitian yang relevan sebagai dasar referensi. Sumber referensi dapat berupa jurnal ilmiah, artikel, skripsi, maupun buku yang berkaitan dengan topik penelitian. Adapun beberapa referensi yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menurut Dasweptia. 2022, dalam jurnal yang berjudul “Analisa Proteksi *Auto Recloser* pada Sistem 150 kV Penghantar Menggala-Gumawang 2 di Gardu Induk Menggala” menyatakan bahwa untuk menganalisis kinerja sistem proteksi *Auto Reclose* pada sistem tenaga listrik jaringan transmisi 150 kV, khususnya dalam mencegah terjadinya

auto-energize pada trafo akibat *reclose* PMT yang tidak tepat waktu serta meningkatkan keandalan sistem setelah terjadinya gangguan sementara. Sistem proteksi yang menggunakan skema Three Phase *Auto Reclose* (TPAR) dengan tambahan *relay* RTN (*Relay* Tegangan Nol) mampu mencegah terjadinya penutupan kembali saat tegangan sistem belum stabil. Pengaturan waktu zone 1 instant terbukti efektif dalam meminimalkan waktu gangguan sementara.

2. Menurut Krisnadi. 2021, dalam jurnal yang berjudul “Analisis Pengujian *Auto Recloser* Circuit Breaker 150 kV Menggunakan Alat DOBLE F6150” yang memiliki tujuan untuk menguji keandalan dan keakuratan fungsi *Auto Reclose* pada circuit breaker 150 kV dengan menggunakan alat uji DOBLE F6150, yang berfungsi untuk memastikan kesesuaian waktu kerja proteksi dengan standar operasional. Menunjukkan hasil pengujian bahwa waktu *dead time* dan *reclose time* yang sesuai dengan standar, *reclose* dapat terjadi Ketika kondisi tegangan belum seimbang antara sisi sumber dan sisi beban meskipun tanpa penerapan fungsi sinkronisasi. Hal tersebut berpotensi dapat menyebabkan ketidaksinkronan sistem. Oleh karena itu, fungsi synchronism check *relay* (LLDB) penting untuk menjamin keamanan *reclose* pada suatu sistem tenaga listrik.
3. Menurut Nugroho. 2024, dalam jurnal yang berjudul “Adaptive *Auto Reclose* Scheme Based on *Transient* Stability Prediction” yang bertujuan untuk mengembangkan skema *Auto Reclose* adaptif dengan penyesuaian waktu *reclose* berdasarkan hasil prediksi kestabilan transien sistem tenaga, sehingga dapat menghindari terjadinya ketidakstabilan pasca gangguan. Walaupun dalam penelitian ini masih bersifat simulatif dan belum mempertimbangkan pengaruh fungsi *relay* cek sinkron (LLDB) dalam sistem *reclose* adaptif. Namun dalam hasil simulasi penelitiannya menunjukkan bahwa penerapan *autoreclose* adaptif mampu menentukan waktu *reclose* yang optimal sesuai kondisi sistem dan menghasilkan peningkatan kestabilan dan penurunan risiko out-of-step.
4. Dalam buku pedoman PLN Pusat. 2021, tentang “Standar Perlindungan Sistem Tenaga Listrik” terdapat acuan teknis mengenai sistem proteksi tenaga listrik di lingkungan

PLN, termasuk pengaturan batas parameter sinkronisasi tegangan, frekuensi, dan sudut fase dalam penerapan fungsi *Auto Reclose* dan synchronism check (LLDB) pada jaringan transmisi. Standar ini menghasilkan batas teknis operasional untuk *relay* LLDB, seperti selisih tegangan maksimum 10%, frekuensi maksimum 0,2 Hz, dan perbedaan sudut fase maksimum 10° sebelum penutupan kembali dilakukan.

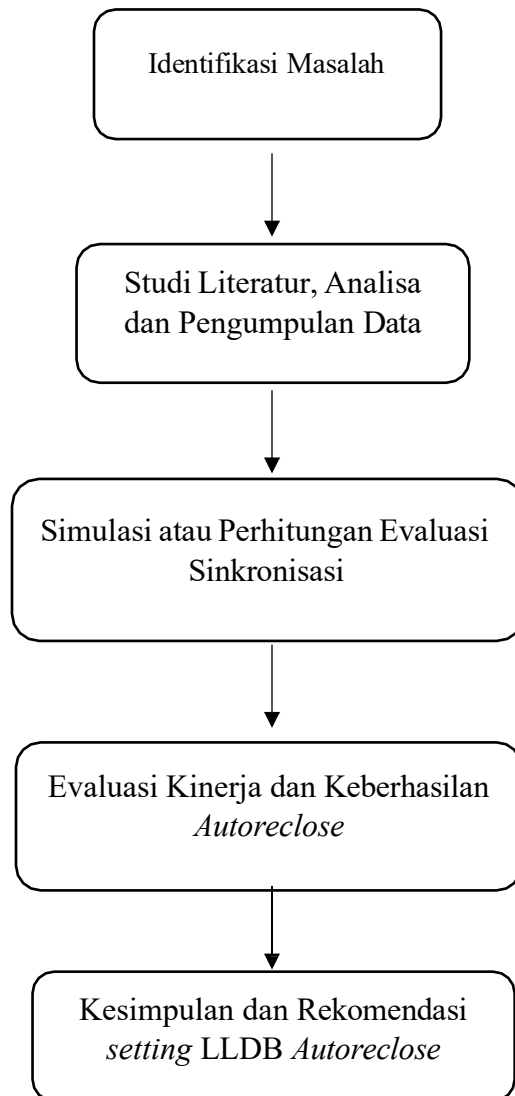
Tabel 2. 3 Penelitian yang Relevan

No	Judul dan Tahun	Masalah	Metodologi	Hasil	Riset Gap
1.	“Analisa Proteksi <i>Auto Recloser</i> pada Sistem 150 kV Penghantar Menggala-Gumawang 2 di Gardu Induk Menggala” (Dasweptia. 2022)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini adalah belum optimalnya sistem proteksi <i>autoreclose</i> pada jaringan transmisi 150 kV sehingga berpotensi menyebabkan auto-energize pada trafo dan gangguan berulang ketika terjadi <i>reclose</i> .	Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan menganalisis sistem proteksi eksisting, pengumpulan data <i>relay</i> , dan evaluasi <i>setting</i> AR (<i>dead time</i> , <i>reclose time</i> , dan <i>relay</i> tambahan RTN).	Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem menggunakan Three Phase <i>Auto Reclose</i> (TPAR) dengan tambahan <i>Relay</i> Tegangan Nol (RTN) untuk mencegah penutupan kembali saat tegangan belum stabil. <i>Setting</i> waktu zona 1 diatur instant (0s) agar sistem cepat merespon	Penelitian ini belum membahas secara detail tentang <i>relay</i> cek sinkron (LLDB), namun menganalisa pengaruh waktu terhadap kestabilan sinkronisasi dan keamanan operasi setelah <i>reclose</i> .

				gangguan sementara.	
2.	“Analisis Pengujian <i>Auto Recloser</i> Circuit Breaker 150 kV Menggunakan Alat DOBLE F6150” (Krisnadi,I. 2019)	Masalah yang diangkat dalam penelitian ini Adalah belum adanya validasi performa waktu kerja dan keandalan fungsi <i>autoreclose</i> CB 150 kV terhadap standar waktu dan sinkronisasi sistem.	Pengujian menggunakan alat DOBLE F6150 yang berfungsi untuk mensimulasikan sinyal <i>trip</i> dan <i>reclose</i> , lalu mengukur respon waktu, <i>dead</i> time, dan kondisi sinkronisasi pada circuit breaker.	Waktu <i>dead</i> time dan <i>reclose</i> sesuai dengan <i>setting</i> , namun hasil pengujian menunjukkan bahwa tanpa fungsi sinkronisasi (cek sinkron), sistem berpotensi menutup saat tegangan belum seimbang antar sisi <i>bus</i> .	Dalam jurnal ini menunjukkan bahwa fungsi sinkronisasi sangat berpengaruh terhadap fungsi dari PMT yang dapat menutup kembali saat tegangan antar sisi belum seimbang.
3.	“Adaptive <i>Auto Reclose</i> Scheme Based on <i>Transient Stability Prediction</i> ”	Penelitian ini bertujuan membahas tentang <i>autoreclose</i> konvensional yang memiliki risiko menurunkan stabilitas sistem	Pemodelan sistem tenaga listrik dengan simulasi <i>transient stability</i> menggunakan perangkat lunak analisis dinamis.	Skema adaptif menghasilkan waktu <i>reclose</i> yang bervariasi sesuai kondisi stabilitas sistem, sehingga menurunkan kemungkinan	Dalam jurnal ini belum diterapkan secara praktis di sistem transmisi nyata terkait integrasi <i>relay</i> cek sinkron LLDB secara

	(Nugroho,B .S., ITB, 2024)	tenaga apabila dilakukan terlalu cepat atau tanpa mempertimbang kan kondisi sinkronisasi setelah gangguan.	Skema AR diubah secara adaptif berdasarkan hasil prediksi kestabilan tegangan, frekuensi, dan sudut rotor generator.	ketidakstabilan pasca <i>reclose</i> .	langsung, namun membahas skema adaptif terkait waktu <i>reclose</i> .
4.	“SPLN T5.002:202 1 – Standar Perlindungan Sistem Tenaga Listrik” (PLN Pusat. 2021)	Diperlukannya panduan teknis baku mengenai Batasan parameter proteksi, termasuk sinkronisasi tegangan dan fungsi <i>autoreclose</i> pada sistem transmisi nasional.	Penyusunan standar nasional berdasarkan hasil evaluasi sistem proteksi eksisting PLN dan referensi standar internasional (IEEE, IEC).	Standar ini menjelaskan batas perbedaan tegangan, frekuensi, dan sudut fase yang diizinkan untuk fungsi LLDB (<i>Live Line-Dead bus</i>) serta integrasinya dengan <i>autoreclose</i> .	Penelitian ini hanya menemukan bahwa batas $\Delta V \leq 10\%$, $\Delta f \leq 0.2 \text{ Hz}$, $\Delta \phi \leq 10^\circ$.

2.3 Kerangka Pemikiran



Gambar 2. 5 Kerangka Pemikiran

Sesuai dengan kerangka pemikiran penulis, kerangka pemikiran penelitian dalam bentuk diagram alur (flowchart) untuk menggambarkan Langkah-langkah logis dalam proses penelitian secara sistematis. Penelitian diawali dengan identifikasi masalah pada sistem proteksi transmisi 150 kV PLN ULTG Ketapang, tepatnya pada gardu induk ketapang, gardu induk sandai, dan gardu induk sukadana yang saling terhubung dengan *single-line connection*. Identifikasi masalah khususnya terkait pada pengaturan *autoreclose* dan *relay* cek sinkron (LLDB) yang belum optimal. Selanjutnya dilakukan studi literatur untuk memperkuat dasar teori standar. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data lapangan berupa data *setting relay* dan waktu kerja *autoreclose* serta *setting relay* cek sinkron. Tahapan berikutnya adalah analisa dan evaluasi teknis, yaitu menghitung parameter sinkronisasi untuk menilai apakah sistem sudah memenuhi syarat sinkronisasi saat *reclose*. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, dilakukan analisis kinerja sistem proteksi untuk mengetahui efektivitas pengaturan yang ada. Akhirnya, penelitian ini menghasilkan Kesimpulan dan rekomendasi *setting* yang optimal untuk meningkatkan keandalan operasi sistem transmisi 150 kV PLN ULTG Ketapang.