Volume xx No xx (Tahun)
Wahana : Tridarma Perguruan Tinggi
ISSN : 2654-4954 (online) | 0853-4403 (Print)
http://jurnal.unipasby.ac.id/index.php/whn

Performance Analysis and Logic Evaluation of the MCTI40 Circuit Breaker Failure Protection System at the Bangil 150 kV GIS

Gatut Budiono[1], Reza Sarwo Widagdo[2], Pungky Setiawan[3]
[123] Program Studi Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya
✉email coresponden author: rezaswidagdo@untag-sby.ac.id
No Hanphone: 085730254203

Abstract

The reliability of transmission power systems is highly dependent on the performance of protection systems in detecting and isolating faults promptly and selectively. One of the critical protection functions is Circuit Breaker Failure (CBF) protection, which operates when a circuit breaker fails to clear a fault after receiving a trip command. This study aims to evaluate the performance and protection logic of the MCTI40 CBF relay installed at the Bulukandang Bay of the 150 kV Bangil Gas Insulated Switchgear (GIS). The research was conducted through short-circuit current analysis, relay performance evaluation based on field test results, and protection logic assessment using wiring diagrams and operational data. The calculated fault currents ranged from 2.13 kA to 4.27 kA, while the relay pickup current was 0.20 kA, resulting in sensitivity levels between 1065% and 2135%. Field testing confirmed that the MCTI40 relay and MVTT14 timer remained operational and capable of performing their intended protection functions. However, the evaluation of the existing protection logic revealed that the re-trip and adjacent trip functions were coordinated through an AND logic configuration, causing the protection response to follow the longest time delay and reducing the effectiveness of sequential operation. The novelty of this study lies in identifying weaknesses within the existing CBF output logic and proposing an improved protection scheme by separating the re-trip and adjacent trip paths and incorporating a blocking function. The proposed modification enhances protection selectivity, response speed, and operational security without requiring replacement of the existing protection devices. The results can serve as a reference for improving breaker failure protection systems in transmission substations with similar configurations.

Abstrak

Keandalan sistem tenaga listrik sangat dipengaruhi oleh kemampuan sistem proteksi dalam mendeteksi dan mengisolasi gangguan secara cepat, selektif, dan andal. Salah satu fungsi proteksi penting pada sistem transmisi adalah *Circuit Breaker Failure* (CBF), yang berperan sebagai proteksi cadangan ketika pemutus tenaga gagal memutus arus gangguan setelah menerima perintah trip. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja dan mengevaluasi logika proteksi relai CBF MCTI40 pada Bay Bulukandang GIS 150 kV Bangil. Metode

Article History
Received :
Accepted :

Keywords:
circuit breaker failure
breaker failure protection
GIS 150 kV
protection relay
transmission protection

Kata kunci:
Circuit Breaker Failure, proteksi *breaker failure,* GIS 150 kV, relai proteksi, proteksi transmisi

penelitian dilakukan melalui analisis arus hubung singkat, evaluasi hasil pengujian relai, serta analisis logika proteksi berdasarkan diagram pengawatan dan data operasional. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa arus gangguan berada pada rentang 2,13 kA hingga 4,27 kA, sedangkan arus *pickup* relai sebesar 0,20 kA sehingga diperoleh tingkat sensitivitas antara 1065% hingga 2135%. Hasil pengujian lapangan menunjukkan bahwa relai MCTI40 dan pewaktu MVTT14 masih berfungsi sesuai dengan karakteristik operasinya. Namun demikian, evaluasi logika proteksi menunjukkan bahwa konfigurasi keluaran yang menggunakan logika AND pada fungsi *re-trip* dan *adjacent trip* menyebabkan respon sistem mengikuti waktu tunda terbesar sehingga belum sepenuhnya menerapkan prinsip operasi bertahap (*sequential operation*). Kebaruan penelitian ini terletak pada identifikasi kelemahan logika keluaran CBF yang masih digunakan pada sistem eksisting serta pengembangan usulan perbaikan melalui pemisahan jalur *re-trip* dan *adjacent trip* disertai penambahan fungsi blok (*blocking function*). Usulan tersebut mampu meningkatkan selektivitas, kecepatan respons, dan keamanan operasi sistem proteksi tanpa memerlukan penggantian peralatan utama yang telah terpasang. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam evaluasi dan pengembangan sistem proteksi *breaker failure* pada gardu induk transmisi dengan karakteristik yang serupa.

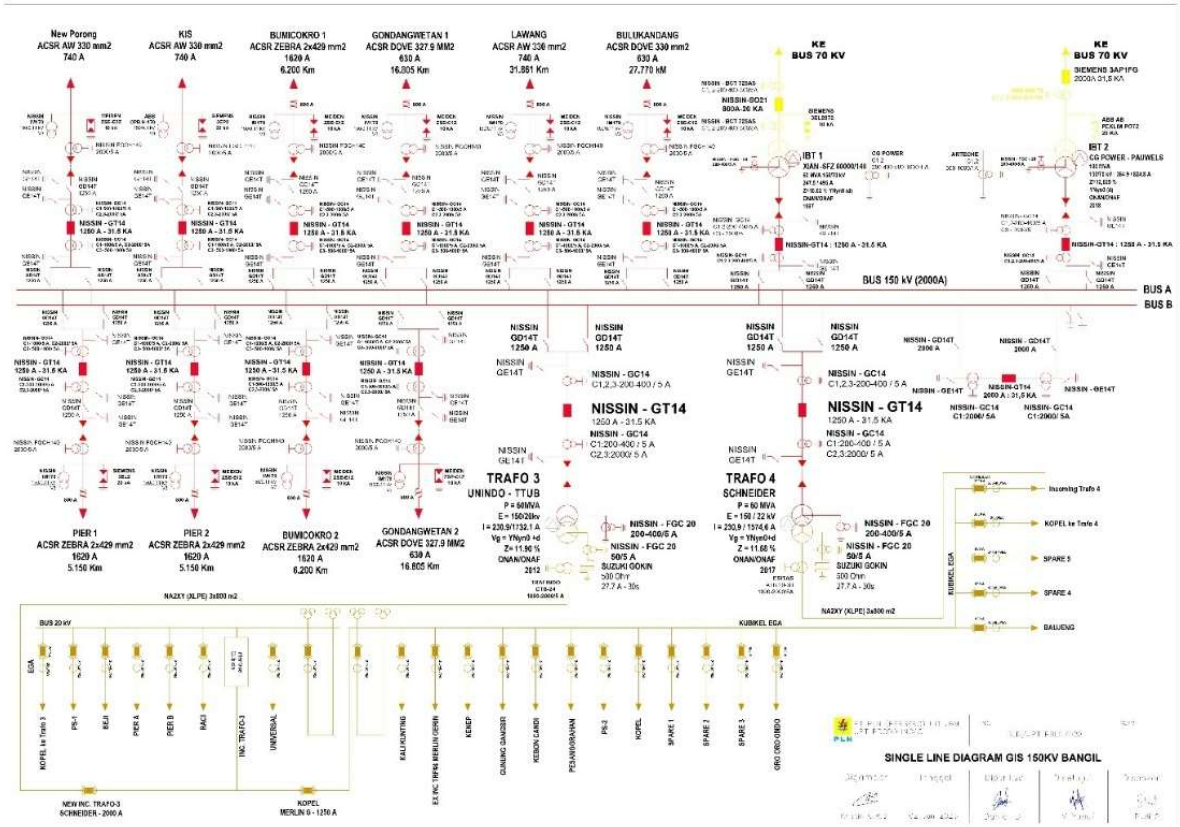
Pendahuluan

Keandalan sistem tenaga listrik sangat bergantung pada kemampuan sistem proteksi dalam mendeteksi dan mengisolasi gangguan secara cepat, selektif, dan andal. Pada sistem transmisi tegangan tinggi, keterlambatan pemutusan gangguan dapat menyebabkan kerusakan peralatan, penurunan stabilitas sistem, serta meluasnya area pemadaman. Oleh karena itu, koordinasi antara relai proteksi dan pemutus tenaga (*circuit breaker*) menjadi aspek penting dalam menjaga kontinuitas penyaluran tenaga listrik(Horowitz dkk., 2022; IEEE Power & Energy Society, 2015).

Salah satu fungsi proteksi cadangan yang banyak diterapkan pada sistem transmisi adalah *Circuit Breaker Failure* (CBF). Proteksi ini bekerja ketika pemutus tenaga gagal menghilangkan arus gangguan setelah menerima perintah trip. Pada sistem *current-based breaker failure protection*, kegagalan pemutus tenaga dideteksi berdasarkan masih adanya arus gangguan setelah perintah *trip* diberikan. Metode ini banyak digunakan karena memiliki struktur logika yang sederhana dan tingkat keandalan yang tinggi (IEEE Power and Energy Society, 2016; Kasztenny & Thompson, 2011).

Pada GIS 150 kV Bangil, fungsi CBF di Bay Bulukandang menggunakan relai MCTI40 sebagai elemen pengawas arus (fault current detector) dan relai MVTT14 sebagai elemen

pewaktu. Konfigurasi sistem ditunjukkan pada Gambar 1. Bay Bulukandang dipilih sebagai objek penelitian karena masih menggunakan kombinasi kedua relai tersebut dalam implementasi proteksi CBF (GEC ALSTHOM T&D, 1998; Whittaker dkk., 2016).



Gambar 1. SLD GIS Bangil

Berbagai penelitian telah dilakukan terkait koordinasi relai, analisis arus hubung singkat, dan evaluasi sistem proteksi tenaga listrik. Ringkasan penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian terdahulu

Peneliti	Fokus Penelitian	Metode	Keterbatasan	Kesenjangan Penelitian
Widagdo dkk. (2021)	Koordinasi proteksi feeder GIS Karangpilang	Perhitungan dan ETAP	Belum membahas relai CBF	Belum mengevaluasi proteksi *Circuit Breaker Failure* pada sistem transmisi

Peneliti	Fokus Penelitian	Metode	Keterbatasan	Kesenjangan Penelitian
Al Ashar dkk. (2023)	Koordinasi OCR dan DGR	Perhitungan impedansi dan ETAP	Fokus pada proteksi utama	Belum menganalisis proteksi cadangan CBF
Triyono dkk. (2013)	Koordinasi relai PLTU Rembang	Simulasi koordinasi	Tidak membahas sistem CBF	Belum mengevaluasi logika dan kinerja CBF
Slamet dkk. (2024)	Arus hubung singkat dan koordinasi relai	Perhitungan dan simulasi	Tidak membahas logika CBF	Belum mengkaji pengaruh logika proteksi terhadap operasi CBF
Sugiarto dkk. (2021)	Kinerja relai transformator GIS Karangpilang	ETAP dan analisis proteksi	Belum mengevaluasi CBF secara spesifik	Belum melakukan evaluasi relai dan logika CBF pada GIS
Penelitian Ini	Evaluasi kinerja dan logika CBF MCTI40 GIS 150 kV Bangil	Perhitungan arus hubung singkat, evaluasi relai, dan analisis logika	-	Menganalisis kinerja relai CBF sekaligus mengevaluasi dan memperbaiki logika proteksi CBF

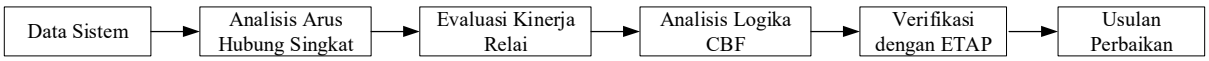
Berdasarkan Tabel 1, penelitian terdahulu umumnya berfokus pada koordinasi relai proteksi utama, analisis arus hubung singkat, dan evaluasi sistem proteksi. Namun, kajian yang secara khusus mengevaluasi kinerja relai MCTI40 serta logika operasi *re-trip, adjacent trip*, dan *Direct Transfer Trip* (DTT) pada sistem CBF masih terbatas (Hogue & Vernova, 2024; Kasztenny & Thompson, 2011). Selain itu, belum terdapat penelitian yang mengkaji pengaruh konfigurasi logika keluaran terhadap kecepatan dan selektivitas operasi proteksi CBF pada gardu induk transmisi. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada evaluasi kinerja relai dan logika proteksi CBF di Bay Bulukandang GIS 150 kV Bangil serta penyusunan usulan perbaikan untuk meningkatkan selektivitas dan keandalan sistem.

Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada sistem proteksi *Circuit Breaker Failure* (CBF) Bay Bulukandang GIS 150 kV Bangil, PT PLN (Persero) ULTG Bangil. Data yang digunakan meliputi *single line diagram*, data impedansi sistem, data transformator arus, diagram pengawatan relai CBF, hasil pengujian relai MCTI40 dan MVTT14, serta dokumen pemeliharaan yang terkait dengan sistem proteksi. Data pendukung diperoleh melalui wawancara dengan personel proteksi dan operasi untuk memverifikasi kondisi aktual sistem di lapangan.

Penelitian diawali dengan pengumpulan dan verifikasi data teknis, kemudian dilanjutkan dengan perhitungan arus hubung singkat menggunakan metode komponen simetris sebagai dasar evaluasi sensitivitas relai terhadap berbagai jenis gangguan (Saadat, 1999). Selanjutnya dilakukan evaluasi kinerja relai berdasarkan hasil pengujian lapangan yang meliputi karakteristik *pickup*, *drop-off*, waktu operasi relai MCTI40, dan kinerja pewaktu MVTT14. Hasil pengujian tersebut dibandingkan dengan prinsip kerja *breaker failure protection* dan standar yang berlaku untuk menilai kelayakan operasi sistem proteksi (Barsch dkk., 2015; PT PLN (Persero), 2024; Whittaker dkk., 2016).

Tahap berikutnya adalah analisis logika proteksi berdasarkan diagram pengawatan yang digunakan pada Bay Bulukandang. Analisis difokuskan pada jalur inisiasi, pengawasan arus (*current supervision*), koordinasi pewaktu, serta logika keluaran yang membentuk fungsi *re-trip*, *adjacent trip*, dan *Direct Transfer Trip* (DTT). Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, disusun usulan perbaikan logika proteksi untuk meningkatkan selektivitas, kecepatan respons, dan keamanan operasi sistem CBF.



Gambar 2. Tahapan Penelitian

Hasil dan Pembahasan

Analisis Arus Hubung Singkat

Analisis arus hubung singkat dilakukan untuk mengetahui besarnya arus gangguan yang mungkin terjadi pada Bay Bulukandang GIS 150 kV Bangil. Besaran arus gangguan merupakan parameter utama dalam evaluasi sistem proteksi karena menentukan kemampuan relai dalam mendeteksi gangguan dan mengaktifkan fungsi *Circuit Breaker Failure* (CBF).

Pada sistem CBF berbasis pengawasan arus (*current supervision*), relai akan mengidentifikasi kegagalan pemutus tenaga apabila arus gangguan masih terdeteksi setelah perintah trip diberikan (IEEE Power and Energy Society, 2016; Kasztenny & Thompson, 2011).

Perhitungan arus hubung singkat dilakukan menggunakan metode komponen simetris berdasarkan impedansi urutan positif, negatif, dan nol sistem . Hasil perhitungan untuk beberapa jenis gangguan pada Bay Bulukandang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Arus Hubung Singkat pada Bay Bulukandang

Jenis Gangguan	Arus Gangguan (kA)
satu fasa ke tanah	2,94
dua fasa	3,70
dua fasa ke tanah	2,51
tiga fasa	4,27

Berdasarkan Tabel 2, hasil perhitungan menunjukkan bahwa gangguan tiga fasa menghasilkan arus hubung singkat terbesar sebesar 4,27 kA, sedangkan hasil pendekatan analitis untuk gangguan dua fasa ke tanah diperoleh sebesar 2,51 kA. Perbedaan besarnya arus hubung singkat pada setiap jenis gangguan dipengaruhi oleh karakteristik impedansi urutan positif, negatif, dan nol yang membentuk lintasan arus gangguan sesuai metode komponen simetris (Saadat, 1999). Pada penelitian ini, perhitungan gangguan dua fasa ke tanah menggunakan persamaan analitis berdasarkan Hadi Saadat sehingga nilai yang diperoleh merupakan pendekatan untuk evaluasi sistem proteksi, sedangkan verifikasi terhadap kondisi sistem aktual dilakukan melalui simulasi ETAP pada pembahasan berikutnya.

Hasil perhitungan arus hubung singkat selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi sensitivitas relai *Circuit Breaker Failure* (CBF) terhadap berbagai kondisi gangguan. Berdasarkan data pengujian, relai MCTI40 menggunakan transformator arus dengan rasio 1000/5 A dan arus *pickup* sebesar 1 A pada sisi sekunder atau setara dengan 0,20 kA pada sisi primer. Parameter tersebut digunakan untuk menghitung *Sensitivity Factor* (SF) sebagai indikator kemampuan relai dalam mendeteksi arus gangguan. Semakin besar nilai SF, semakin tinggi sensitivitas relai terhadap gangguan yang terjadi (GEC ALSTHOM T&D, 1998). Hasil analisis sensitivitas ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis Sensitivitas Relai CBF

Jenis Gangguan	Arus Gangguan (kA)	*Pickup* (kA)	Sensitivitas (%)

1 fasa ke tanah	2,94	0,20	1470
2 fasa	3,70	0,20	1850
2 fasa ke tanah	2,51	0,20	1255
3 fasa	4,27	0,20	2135

Tabel 3 menunjukkan bahwa seluruh arus gangguan berada jauh di atas nilai pickup relai dengan sensitivitas antara 1065% hingga 2135%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fungsi pengawasan arus pada sistem CBF masih memiliki margin operasi yang sangat memadai sehingga relai mampu mendeteksi seluruh jenis gangguan yang dianalisis.

Hasil analisis ini menunjukkan bahwa potensi disfungsi sistem proteksi tidak disebabkan oleh rendahnya arus gangguan atau ketidakmampuan relai dalam mendeteksi gangguan. Oleh karena itu, evaluasi selanjutnya difokuskan pada kinerja relai dan konfigurasi logika proteksi yang diterapkan pada sistem *Circuit Breaker Failure* Bay Bulukandang.

Evaluasi Kinerja Relai CBF

Evaluasi kinerja relai dilakukan berdasarkan hasil pengujian lapangan terhadap relai MCTI40 dan pewaktu MVTT14 yang digunakan pada sistem *Circuit Breaker Failure* Bay Bulukandang GIS 150 kV Bangil. Pengujian bertujuan untuk memverifikasi karakteristik operasi relai dalam mendeteksi arus gangguan serta memastikan fungsi pewaktuan masih bekerja sesuai dengan kebutuhan sistem proteksi. Parameter yang dievaluasi meliputi arus *pickup*, karakteristik *drop-off*, waktu operasi relai, serta kinerja pewaktu MVTT14 yang membentuk urutan operasi *breaker failure protection* (GEC ALSTHOM T&D, 1998; IEEE Power and Energy Society, 2016)

Tabel 4. Ringkasan Hasil Pengujian Relai

Parameter	Hasil Pengujian	Evaluasi
Arus *pickup*	1,01–1,07 A	Baik
Arus *drop-off*	0,95–1,01 A	Normal
Waktu operasi relai	5,5–11 ms	Cepat
Pewaktu MVTT14	166,3 ms dan 265,1 ms	Layak
Sensitivitas terhadap arus gangguan	1065–2135%	Sangat baik
Kelayakan operasi	Memenuhi fungsi CBF	Layak digunakan

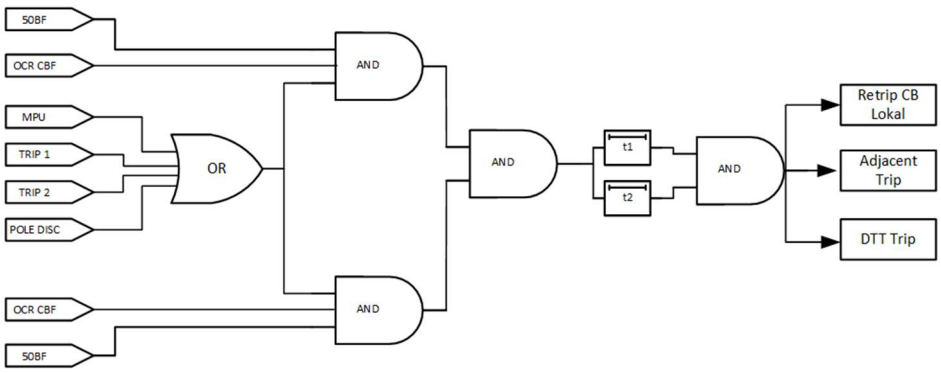
Tabel 4 menunjukkan bahwa relai MCTI40 masih bekerja mendekati nilai setelan awal dengan karakteristik *pickup* dan *drop-off* yang normal. Waktu operasi relai berada pada rentang

5,5–11 ms, sedangkan pewaktu MVTT14 masih bekerja mendekati setelan nominal 150 ms dan 250 ms. Hasil tersebut menunjukkan bahwa fungsi pengawasan arus dan pewaktuan masih bekerja sesuai karakteristik operasinya (GEC ALSTHOM T&D, 1998; Pérez-Molina dkk., 2021; PT PLN (Persero), 2024)

Selain itu, analisis sensitivitas pada Subbab 3.1 menunjukkan bahwa seluruh arus gangguan berada jauh di atas nilai *pickup* relai, dengan sensitivitas antara 1065% hingga 2135%. Oleh karena itu, relai MCTI40 dan pewaktu MVTT14 masih memenuhi persyaratan teknis untuk dioperasikan sebagai bagian dari sistem proteksi *Circuit Breaker Failure*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa potensi permasalahan pada Bay Bulukandang lebih berkaitan dengan konfigurasi logika proteksi dibandingkan dengan kondisi peralatan proteksi.

Analisis Logika CBF Eksisting

Analisis logika dilakukan untuk mengevaluasi mekanisme operasi *Circuit Breaker Failure* berdasarkan tahapan *trip initiation*, *current supervision*, *timer coordination*, *re-trip*, *adjacent trip*, dan *Direct Transfer Trip* (DTT) sebagaimana direkomendasikan dalam IEEE C37.119-2016 (Hogue & Vernova, 2024; IEEE Power and Energy Society, 2016; Kasztenny & Thompson, 2011).



Gambar 3. Logika Lengkap CBF Bay Bulukandang

Gambar 3 menunjukkan bahwa fungsi CBF dibentuk oleh kombinasi sinyal inisiasi, pengawasan arus, pewaktuan, dan keluaran proteksi. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa keluaran pewaktu t1 dan t2 masih dikombinasikan menggunakan logika AND sehingga fungsi *re-trip* dan *adjacent trip* cenderung mengikuti waktu tunda terbesar. Kondisi ini menyebabkan operasi bertahap (*sequential operation*) belum berjalan optimal dan menjadi kelemahan utama pada logika CBF eksisting (IEEE Power and Energy Society, 2016; Kasztenny & Thompson, 2011; Whittaker dkk., 2016).

Ringkasan evaluasi logika proteksi eksisting disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Evaluasi Logika Eksisting

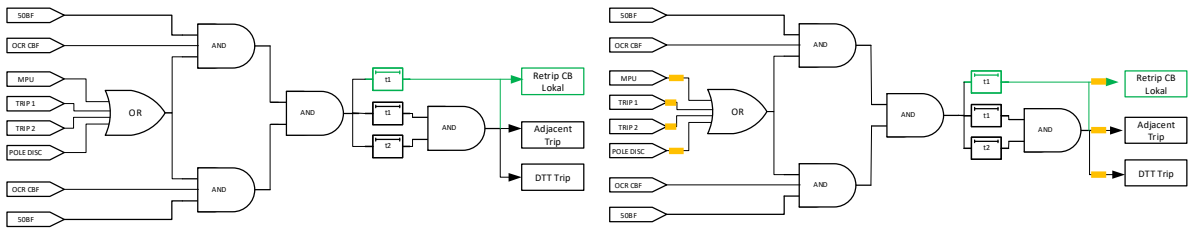
Parameter	Hasil Evaluasi
Inisiasi CBF	Baik
Supervisi arus	Baik
Fungsi *re-trip*	Kurang optimal
Fungsi *adjacent trip*	Berfungsi
Operasi bertahap	Belum optimal
Selektivitas sistem	Perlu ditingkatkan
Keandalan logika	Dapat ditingkatkan

Berdasarkan Tabel 5, fungsi inisiasi dan pengawasan arus telah bekerja dengan baik. Namun, konfigurasi logika keluaran menyebabkan operasi *re-trip* dan *adjacent trip* belum berlangsung secara optimal. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan kinerja sistem lebih efektif dilakukan melalui penyempurnaan logika proteksi dibandingkan penggantian peralatan yang masih berfungsi dengan baik.

Usulan Perbaikan Sistem Proteksi CBF

Hasil evaluasi pada Subbab 3.3 menunjukkan bahwa relai MCTI40 dan pewaktu MVTT14 masih berfungsi dengan baik, namun konfigurasi logika keluaran belum sepenuhnya menerapkan filosofi operasi bertahap (*sequential operation*) pada sistem Circuit Breaker Failure (CBF). Oleh karena itu, dilakukan usulan perbaikan logika proteksi yang difokuskan pada pemisahan jalur *re-trip* dan *adjacent trip* serta penambahan fungsi blok (*blocking function*) untuk meningkatkan selektivitas dan keandalan sistem proteksi.

Usulan perbaikan logika CBF ditunjukkan pada Gambar 4. Perbaikan dilakukan dalam dua tahap, yaitu penyempurnaan logika operasi CBF dan penambahan fungsi blok untuk mencegah operasi yang tidak diperlukan pada kondisi tertentu.



(a) Usulan Perbaikan Logika CBF **(b) Usulan Perbaikan Logika CBF dengan Fungsi Blok**

Gambar 4. Logika CBF Setelah Perbaikan dan Blok

Gambar 4(a) menunjukkan perbaikan logika CBF melalui pemisahan jalur *re-trip* dan *adjacent trip*. Konfigurasi ini memungkinkan *re-trip* bekerja lebih cepat melalui pewaktu t1 sehingga operasi proteksi menjadi lebih sesuai dengan filosofi *breaker failure protection*. Gambar 4(b) menunjukkan penambahan fungsi blok (*blocking function*) untuk mencegah operasi *adjacent trip* dan *DTT trip* yang tidak diperlukan. Fungsi ini meningkatkan selektivitas dan keamanan operasi sistem proteksi.

Secara keseluruhan, usulan logika baru meningkatkan kecepatan respons, selektivitas, dan keandalan sistem CBF. Perbandingan antara logika eksisting dan logika hasil perbaikan ditunjukkan pada Tabel 6.

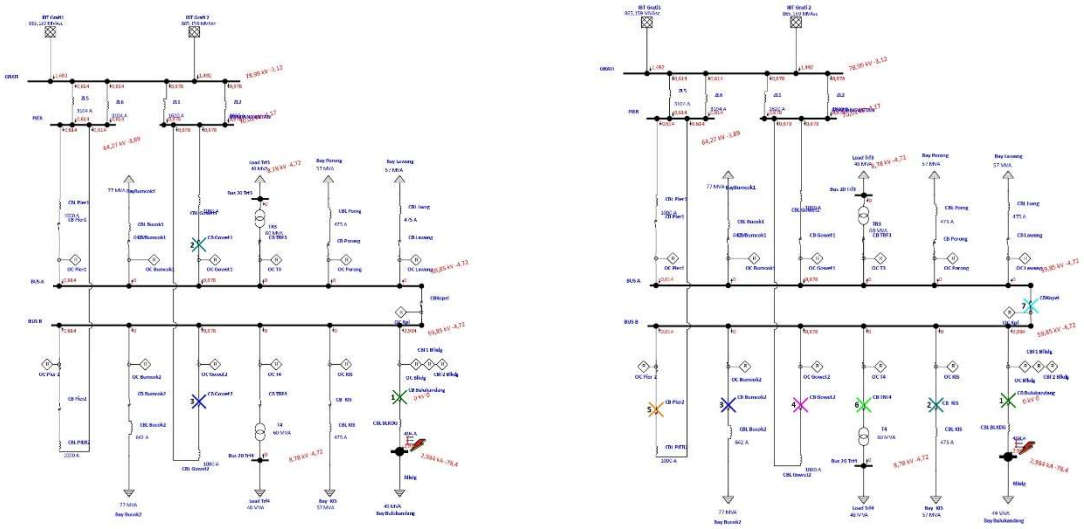
Tabel 6. Perbandingan Logika Eksisting dan Logika Hasil Perbaikan

Parameter	Logika Eksisting	Logika Hasil Perbaikan
Jalur *re-trip*	Mengikuti t2	Langsung melalui t1
Jalur *adjacent trip*	Mengikuti t2	Tetap melalui t2
Operasi bertahap	Belum optimal	Sesuai filosofi CBF
Selektivitas	Sedang	Meningkat
Kecepatan respons *re-trip*	250 ms	150 ms
Fungsi blok	Tidak tersedia	Tersedia
Keandalan sistem	Baik	Lebih baik

Berdasarkan Tabel 6, usulan perbaikan mampu meningkatkan selektivitas, mempercepat respon proteksi, dan mengurangi risiko salah operasi melalui penerapan fungsi blok. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kinerja sistem CBF dapat dicapai melalui penyempurnaan logika proteksi tanpa memerlukan penggantian relai maupun peralatan utama yang masih berfungsi dengan baik.

Verifikasi Logika CBF Menggunakan Simulasi ETAP

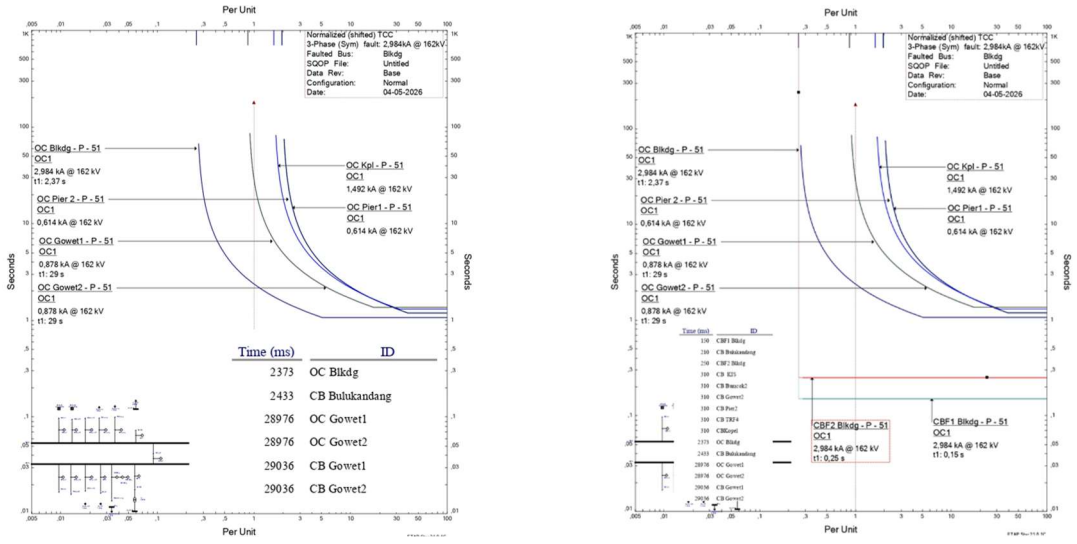
Untuk memverifikasi efektivitas usulan perbaikan logika CBF, dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP pada kondisi gangguan tiga fasa di Bay Bulukandang. Simulasi dilakukan dengan membandingkan respons sistem pada kondisi CBF tidak aktif (*CBF disabled*) dan CBF aktif (*CBF enabled*) untuk mengevaluasi urutan operasi proteksi, kecepatan pemutusan gangguan, dan kinerja proteksi cadangan.



(a) CBF Tidak Aktif **(b) CBF Aktif**

Gambar 5. Simulasi Gangguan Tiga Fasa Bay Bulukandang

Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi gangguan tiga fasa di Bay Bulukandang pada kondisi CBF tidak aktif dan CBF aktif. Pada kondisi *CBF disabled* (Gambar 5(a)), pemutusan gangguan bergantung pada operasi relai proteksi utama dan pemutus tenaga lokal. Sebaliknya, pada kondisi *CBF enabled* (Gambar 5(b)), sistem mampu menginisiasi fungsi *re-trip* dan *adjacent trip* ketika pemutus tenaga gagal beroperasi. Hal ini menunjukkan bahwa aktivasi logika CBF memberikan lapisan proteksi tambahan untuk memastikan gangguan tetap dapat diisolasi secara selektif.



(a) CBF Tidak Aktif **(b) CBF Aktif**

Gambar 6. Kurva Time Current Coordination (TCC) dan Urutan Operasi Proteksi

Gambar 6 menunjukkan kurva koordinasi waktu-arus (*Time Current Coordination*) dan urutan operasi proteksi hasil simulasi ETAP. Pada kondisi *CBF disabled* (Gambar 6(a)), pemutusan gangguan dilakukan oleh relai OCR Bay Bulukandang dengan waktu operasi sekitar 2,37 s dan pemutus tenaga membuka pada 2,43 s. Sementara itu, pada kondisi *CBF enabled* (Gambar 6(b)), fungsi CBF1 bekerja setelah 150 ms dan CBF2 setelah 250 ms, sehingga *adjacent trip* dapat dilakukan sekitar 310 ms setelah gangguan terjadi. Hasil ini menunjukkan bahwa usulan logika CBF mampu mempercepat respons proteksi dan meningkatkan selektivitas dibandingkan konfigurasi eksisting.

Secara keseluruhan, hasil simulasi ETAP memverifikasi bahwa usulan perbaikan logika CBF mampu menerapkan operasi *breaker failure protection* secara bertahap sesuai filosofi proteksi yang direkomendasikan. Penerapan jalur *re-trip* yang terpisah, *adjacent trip*, dan fungsi blok meningkatkan kecepatan pemutusan gangguan, selektivitas, serta keandalan operasi sistem proteksi tanpa memerlukan penggantian peralatan utama yang telah terpasang.

Untuk memperjelas pengaruh implementasi logika CBF terhadap kinerja sistem proteksi, hasil simulasi ETAP pada kondisi CBF tidak aktif dan CBF aktif dirangkum pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Simulasi ETAP Sebelum dan Sesudah Implementasi CBF

Parameter	CBF Tidak Aktif	CBF Aktif
Fungsi Re-trip	Tidak tersedia	Tersedia
Fungsi Adjacent Trip	Tidak tersedia	Tersedia
Operasi CBF1	–	150 ms
Operasi CBF2	–	250 ms
Adjacent Trip	–	310 ms
Operasi OCR Bay Bulukandang	2373 ms	2373 ms
Pembukaan PMT Bay Bulukandang	2433 ms	2433 ms
Kemampuan Proteksi Cadangan	Tidak tersedia	Tersedia
Operasi Bertahap (*Sequential Operation*)	Belum diterapkan	Diterapkan
Selektivitas Sistem Proteksi	Sedang	Meningkat

Tabel 7 menunjukkan bahwa implementasi logika CBF menambahkan fungsi *re-trip* dan *adjacent trip* sebagai mekanisme proteksi cadangan ketika pemutus tenaga gagal beroperasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa CBF1 bekerja pada 150 ms dan CBF2 pada 250 ms, sehingga *adjacent trip* dapat dilakukan sekitar 310 ms setelah gangguan terjadi. Dibandingkan

konfigurasi tanpa CBF, usulan logika baru mampu meningkatkan selektivitas dan mempercepat respons proteksi cadangan tanpa mengubah perangkat proteksi yang telah terpasang.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa relai MCTI40 dan pewaktu MVTT14 pada sistem *Circuit Breaker Failure* (CBF) Bay Bulukandang GIS 150 kV Bangil masih berfungsi dengan baik dan memiliki sensitivitas yang tinggi terhadap seluruh jenis gangguan yang dianalisis. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa potensi kelemahan sistem tidak terletak pada kinerja relai, melainkan pada konfigurasi logika keluaran yang menyebabkan fungsi *re-trip* dan *adjacent trip* belum bekerja secara optimal sesuai filosofi operasi bertahap (*sequential operation*). Kebaruan penelitian ini terletak pada identifikasi kelemahan logika CBF eksisting serta pengembangan usulan perbaikan melalui pemisahan jalur *re-trip* dan *adjacent trip* disertai penambahan fungsi blok (*blocking function*). Usulan tersebut mampu meningkatkan selektivitas, kecepatan respons, dan keamanan operasi sistem tanpa memerlukan penggantian peralatan utama yang telah terpasang. Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi dalam evaluasi dan pengembangan sistem proteksi *breaker failure* pada gardu induk transmisi dengan karakteristik yang serupa.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, PT PLN (Persero) UPT Probolinggo, dan ULTG Bangil atas dukungan, izin penelitian, serta penyediaan data yang diperlukan dalam penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Tim Proteksi ULTG Probolinggo, Tim GIS 150 kV Bangil, dan dosen pembimbing atas bantuan, arahan, dan masukan selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan artikel ini.

Daftar Pustaka

Barsch, J., Lukach, D., Agudelo, L., Anderson, J., Brunello, G., Burkart, D., Busot, D., Casilla, N., Fontana, D., Garcia, R., Joshi, B., Kobet, G., Miller, J., Mooney, J., Patel, M., Patti, C., Ryan, G., Tualla, I., Tuladhar, L., … Whittaker, R. (2015). *What ' s New in C37 . 113 TM -2015 , IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines*. 1–6.

GEC ALSTHOM T&D. (1998). *Protective relays for power systems.pdf*. Stafford, United

Kingdom.

Hogue, S., & Vernova, G. E. (2024). *Circuit-Breaker-Failure Protection : A Logical Design Path*.

Horowitz, S. H., Phadke, A. G., & & Henville, C. F. (2022). Power system relaying. In *Choice Reviews Online* (Vol. 30, Nomor 09). https://doi.org/10.5860/choice.30-5021

IEEE Power & Energy Society. (2015). *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines* (Vol. 2015).

IEEE Power and Energy Society. (2016). *C37.119-2016 - IEEE Guide for Breaker Failure Protection of Power Circuit Breakers*. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7509575

Kasztenny, B., & Thompson, M. J. (2011). Breaker failure protection - Standalone or integrated with zone protection relays? *2011 64th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, *April 2011*, 385–395. https://doi.org/10.1109/CPRE.2011.6035639

Pérez-Molina, M. J., Larruskain, D. M., Eguía, P., & Abarrategi, O. (2021). Circuit Breaker Failure Protection Strategy for HVDC Grids. *Energies*, *14*(14), 4326. https://doi.org/10.3390/en14144326

PT PLN (Persero). (2024). *Standar PT PLN (Persero) Pola proteksi busbar dan diameter gardu induk* (Nomor 0183).

Saadat, H. (1999). *Power System Analysis* (hal. 717). Mc Graw Hill.

Whittaker, R., Mulawarman, A., Barsch, J., Bapary, A., Deronja, A., Long, J., Lu, Y., Lukach, D., Mackie, B., Pickett, B., Sufana, C., Tatro, P., Young, R., & Tualla, I. (2016). *Summary of Revision , IEEE C37 . 119-2016 , Guide for Breaker Failure Protection of Power Circuit Breakers*.