



DESAIN SISTEM PROTEKSI OVERCURRENT DAN GROUND FAULT RELAY UNTUK JARINGAN TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN ETAP 19.0.1

M.Wahyu Prawindu

Universitas Negeri Medan

Muhammad Ilham Hasibbuan

Universitas Negeri Medan

Hutur P Siahaan

Universitas Negeri Medan

Arwadi Sinuraya

Universitas Negeri Medan

Desman Jonto Sinaga

Universitas Negeri Medan

Alamat: JL.William Iskandar PS. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli serdang, Sumatera Utara 20221

Korespondensi penulis: whzu.prawindu@gmail.com

Abstrak. *Medium-voltage (20 kV) power distribution systems are highly susceptible to short-circuit faults and single line-to-ground faults. To ensure system reliability and supply continuity, a protection scheme that is selective, fast, and adaptive to real network conditions is essential. This study aims to design a protection system based on Overcurrent Relays (OCR) and Ground Fault Relays (GFR) using the ETAP 19.0.1 software. The methodology includes single-line system modeling, fault simulations, and analysis of Time-Current Characteristic (TCC) curves and relay selectivity. Simulation results indicate that all relays operate within a selective time range (0.12 s – 0.65 s) without curve overlaps. The minimum selectivity factor (Ks) achieved is 2.1, exceeding the standard threshold of 1.8 for isolated-neutral systems. The proposed design provides reliable protection against high-resistance faults and is suitable for practical implementation in Indonesia's distribution networks.*

Keywords: *ETAP; Overcurrent Relay; Power system protection; Relay coordination; Short-circuit current.*

Abstrak. Sistem distribusi tenaga listrik tegangan menengah (20 kV) sangat rentan terhadap gangguan hubung singkat dan gangguan satu fasa ke tanah. Untuk menjamin keandalan dan kontinuitas suplai, diperlukan sistem proteksi yang selektif, cepat, dan adaptif terhadap kondisi jaringan aktual. Penelitian ini bertujuan merancang sistem proteksi berbasis Overcurrent Relay (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR) menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1. Pendekatan dilakukan melalui pemodelan sistem satu garis, simulasi gangguan, serta analisis kurva TCC dan selektivitas. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh relay bekerja dalam rentang waktu selektif (0,12 s – 0,65 s), tanpa overlap antar kurva. Nilai faktor selektivitas (Ks) minimal mencapai 2,1, melebihi standar minimum 1,8 untuk sistem netral isolasi. Desain yang dihasilkan mampu memberikan proteksi andal terhadap gangguan resistif tinggi dan dapat diimplementasikan langsung pada sistem distribusi Indonesia.

Kata Kunci: *ETAP; Ground Fault Relay; Gangguan fasa-ke-tanah; Overcurrent Relay; Proteksi sistem*

PENDAHULUAN

Jaringan distribusi tegangan menengah (20 kV) merupakan tulang punggung dalam sistem penyaluran daya dari gardu induk ke beban akhir, baik industri maupun komersial. Dalam

pengoperasiannya, sistem ini rentan terhadap berbagai gangguan kelistrikan, khususnya gangguan hubung singkat dan gangguan satu fasa ke tanah. Gangguan semacam ini, apabila tidak ditangani dengan cepat dan tepat, dapat menyebabkan pemadaman luas, kerusakan peralatan listrik, serta penurunan keandalan sistem tenaga secara keseluruhan (Soewono & Noprianti, 2020).

Perangkat proteksi seperti Overcurrent Relay (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR) menjadi komponen utama dalam mendeteksi dan memutuskan aliran arus gangguan tersebut. Namun, pengaturan parameter proteksi (setting relay) yang tidak akurat dapat menimbulkan masalah baru seperti keterlambatan pemutusan, kegagalan selektivitas, atau bahkan non-aktifnya proteksi saat terjadi gangguan (Zakri et al., 2023). Oleh karena itu, desain sistem proteksi dengan perhitungan dan simulasi yang tepat menjadi langkah krusial dalam meningkatkan keamanan dan keandalan operasi sistem distribusi.

Di sisi lain, karakteristik gangguan satu fasa ke tanah pada jaringan dengan sistem pentanahan netral terisolasi atau melalui impedansi tinggi, memerlukan pendekatan deteksi khusus. Gangguan ini umumnya menghasilkan arus gangguan yang kecil, sehingga seringkali tidak terdeteksi oleh sistem proteksi konvensional (Toader et al., 2021). Pendekatan berbasis arus sekuen nol dan metode directional ground fault protection telah terbukti lebih efektif dalam kondisi ini (Kuliński & Heyduk, 2024).

Untuk merancang sistem proteksi yang handal dan selektif, perangkat lunak analisis sistem tenaga seperti ETAP 19.0.1 dapat digunakan. ETAP menyediakan berbagai fitur analisis, seperti perhitungan arus hubung singkat berbasis standar IEC/ANSI, simulasi kurva TCC (Time-Current Characteristic), serta setting dan koordinasi relay proteksi secara menyeluruh. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa penerapan ETAP mampu menghasilkan rancangan sistem proteksi yang sesuai dengan kondisi aktual lapangan serta standar proteksi yang berlaku (Sanusi et al., 2022).

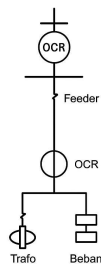
Meskipun demikian, studi-studi terdahulu di Indonesia masih terbatas pada analisis arus hubung singkat tanpa dilanjutkan pada tahap desain dan evaluasi sistem proteksi secara komprehensif. Oleh karena itu, dibutuhkan penelitian yang merancang sistem proteksi OCR dan GFR menggunakan ETAP berdasarkan hasil analisis gangguan aktual, serta mempertimbangkan karakteristik sistem distribusi yang ada, terutama pada jaringan dengan pentanahan tidak langsung.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam bentuk template desain sistem proteksi yang adaptif, selektif, dan sesuai standar, serta dapat diimplementasikan dalam sistem distribusi tegangan menengah yang ada di Indonesia.

KAJIAN TEORITIS

A. Overcurrent Relay (OCR)

Overcurrent Relay (OCR) merupakan salah satu perangkat proteksi paling mendasar dan penting dalam sistem tenaga listrik.



Gambar 1 Single Line Diagram

Fungsi utamanya adalah untuk mendeteksi arus lebih, baik akibat beban berlebih maupun gangguan hubung singkat dan memberikan sinyal trip kepada pemutus tenaga (circuit breaker) untuk memutuskan aliran listrik pada bagian yang terganggu. Dengan demikian, OCR berperan dalam menjaga keandalan dan kontinuitas suplai listrik serta melindungi peralatan dari kerusakan akibat lonjakan arus.

Dalam praktiknya, setting OCR melibatkan penentuan nilai pickup current dan Time Multiplier Setting (TMS) berdasarkan kondisi arus beban dan karakteristik sistem. Tabel berikut menyajikan contoh pengaturan parameter OCR pada beberapa titik dalam sistem distribusi:

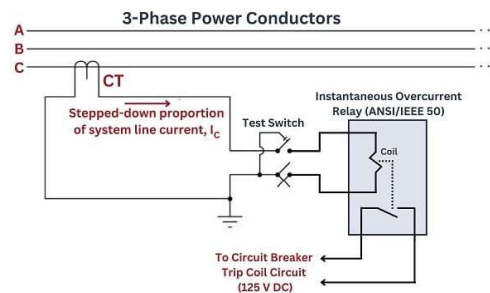
**DESAIN SISTEM PROTEKSI OVERCURRENT DAN GROUND FAULT RELAY UNTUK
JARINGAN TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN ETAP 19.0.1**

Tabel 1 Setting OCR

Example OCR Setting				
Location	Pickup Current	TMS	Estimated Time (s)	Kurva
Feeder	400 A	0,5	Tergantung grafik	Standard Inverse
Trafo	300 A	0,2	Lebih cepat	Extremely Inverse
Beban	250 A	0,3	Sedang	Very Inverse

OCR diklasifikasikan menjadi dua tipe utama berdasarkan karakteristik waktunya, yaitu Instantaneous Overcurrent Relay (ANSI 50) dan Time-Delayed Overcurrent Relay (ANSI 51).

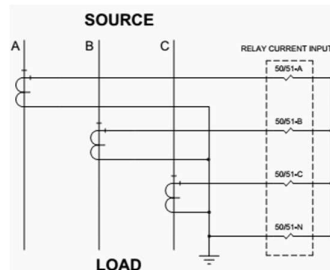
a) Instantaneous OCR (ANSI 50)



Gambar 2 Instantaneous OCR (ANSI 50)

OCR tipe ANSI 50 bekerja tanpa penundaan waktu (tanpa delay) dan dirancang untuk merespon gangguan dengan sangat cepat ketika arus melebihi ambang batas pickup yang telah ditentukan. Relay jenis ini biasanya digunakan pada titik-titik yang dekat dengan sumber atau gardu induk, di mana kecepatan pemutusan sangat kritis. Namun, karena tidak memiliki kemampuan koordinasi waktu, penggunaannya harus sangat hati-hati agar tidak menyebabkan trip pada area yang seharusnya tidak terganggu (mis-coordination).

b) Time-delayed OCR (ANSI 51)



Gambar 3 Time-delayed OCR (ANSI 51)

OCR tipe ANSI 51 memiliki waktu kerja yang tertunda dan bergantung pada besar arus gangguan yang terdeteksi. Semakin besar arus gangguan, maka semakin cepat relay akan bekerja. Karakteristik ini dikenal sebagai Inverse Definite Minimum Time (IDMT). Terdapat beberapa jenis kurva IDMT yang lazim digunakan, seperti standard inverse, very inverse, dan extremely inverse. Pemilihan kurva ini disesuaikan dengan kondisi sistem, jenis beban, serta kebutuhan selektivitas. Kurva very inverse misalnya, sering digunakan untuk saluran distribusi dengan karakteristik gangguan tinggi di bagian ujung jaringan.

Dalam merancang setting OCR, dua parameter utama harus diperhatikan, yaitu pickup current (I_{pickup}) dan Time Multiplier Setting (TMS).

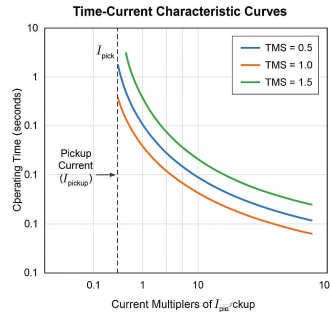
a) Pickup Current (I_{pickup})

DESAIN SISTEM PROTEKSI OVERCURRENT DAN GROUND FAULT RELAY UNTUK JARINGAN TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN ETAP 19.0.1

Pickup current ditentukan berdasarkan nilai arus beban maksimum normal yang dialami sistem, biasanya antara 1,2 hingga 1,5 kali arus nominal beban

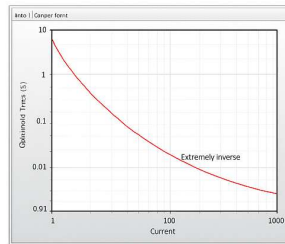
b) Time Multiplier Setting (TMS)

TMS adalah parameter pengali yang digunakan untuk menyesuaikan posisi kurva karakteristik waktu pada grafik TCC (Time-Current Characteristic). Pemilihan TMS dan pickup yang tepat akan menghasilkan sistem proteksi yang selektif artinya hanya relay yang paling dekat dengan gangguan yang bekerja.



Gambar 4 Kurva TCC (Time-Current Characteristic)

Agar sistem proteksi dapat bekerja secara selektif dan terkoordinasi, maka kurva kerja antar relay harus disusun sedemikian rupa agar tidak saling tumpang tindih. Jarak waktu antar kurva relay yang disebut sebagai grading margin disarankan minimal 0,2 hingga 0,4 detik. Jika terlalu kecil, dikhawatirkan terjadi overlap kerja antara relay upstream dan downstream, yang menyebabkan pemutusan yang tidak diperlukan dan memperbesar area yang terdampak gangguan.



Gambar 5 Kurva TCC dari ETAP

Perangkat lunak seperti ETAP versi 19.0.1 sangat membantu dalam merancang sistem proteksi berbasis OCR. Melalui fitur STAR TCC Coordination, engineer dapat memodelkan sistem jaringan secara satu garis (single line diagram), memasukkan parameter setting relay, serta mensimulasikan kurva TCC. Dengan visualisasi grafik ini, kita dapat memastikan bahwa relay bekerja dengan baik, tidak saling mengganggu, dan mampu mengisolasi gangguan secara cepat dan tepat. Penggunaan ETAP juga memungkinkan perhitungan arus hubung singkat berdasarkan standar IEEE 141 atau IEC 60909 secara otomatis.

B. Ground Fault Relay (GFR)

Ground Fault Relay (GFR) bertugas mendeteksi gangguan fasa ke tanah dengan mengukur arus residual (arus sekuens nol). GFR sangat penting dalam menjaga keandalan jaringan yang netralnya tidak langsung di-ground, karena gangguan fasa ke tanah dapat terjadi kapan saja akibat kerusakan isolasi, kelembapan, atau kontak tidak sengaja ke tanah.

Salah satu karakteristik penting GFR adalah tingginya sensitivitas terhadap arus gangguan kecil. Dalam jaringan netral isolasi, arus fasa ke tanah hanya mengalir melalui kapasitansi kabel atau saluran, sehingga arus gangguan bisa sangat rendah, biasanya hanya beberapa hingga puluhan ampere. Arus rendah ini membuat sistem proteksi konvensional menurun efektivitasnya jika tidak dirancang khusus.

a) Deteksi Berdasarkan Arus Sekuens Nol

Prinsip dasar GFR adalah pengukuran arus sekuens nol (I_0) dengan menggunakan zero-sequence CT atau core-offset CT. Ketika arus I_0 melewati nilai pickup setting, relay akan aktif. Teknik ini sangat efektif karena memberikan deteksi langsung setiap "arus bocor" ke tanah

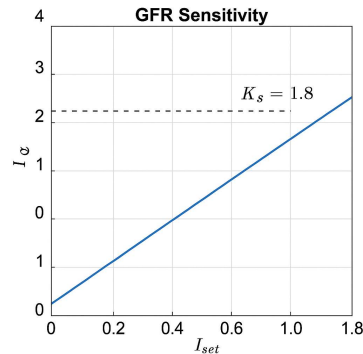
b) Arah dan Sensitivitas (Directional Ground Fault)

Untuk meminimalkan false trip akibat gangguan di jalur lain atau karena imbalance beban, GFR modern mendukung fungsi directional, yaitu hanya merespon arah arus I_0 yang menuju titik pengukuran (forward fault). Studi terbaru tahun 2024 menggunakan metode wavelet/spectral analysis pada jaringan MV dengan netral isolasi untuk membedakan gangguan nyata dari gangguan palsu berdasarkan magnitude dan fasa I_0 .

c) Faktor Sensitivitas dan Penetapan Setting

Sebuah parameter penting adalah faktor sensitivitas (K_s), rasio antara arus sekuens nol aktual saat gangguan dan setting relay:

$$K_s = \frac{I_{Fault}^0}{I_{Set}}$$



Gambar 6 Grafik Sensitivitas GFR (I_0 dan I_{set})

Berdasarkan penelitian kasus tambang dan jaringan MV dan gambar 6, nilai minimal K_s yang direkomendasikan adalah ≥ 1.8 agar relay tetap responsif meskipun gangguan terjadi dengan resistansi tinggi ($\geq 1 \text{ k}\Omega$). Setting terlalu tinggi dapat menyebabkan gangguan resistif tidak terdeteksi. Seperti terlihat pada Gambar 6, area di atas garis $K_s = 1.8$ menunjukkan zona aman di mana relay akan merespons gangguan tanah secara andal. Jika nilai I_0 terlalu dekat dengan I_{set} , maka ada risiko gangguan tidak terdeteksi sepenuhnya, terutama untuk gangguan resistif tinggi.

C. Karakteristik Ground Fault Pada Isolated Neutral

Sistem distribusi dengan netral terisolasi (isolated neutral) secara intentional tidak menghubungkan titik netral ke tanah. Akibatnya, saat terjadi gangguan satu fasa ke tanah, arus ground fault sangat rendah, umumnya hanya berada pada rentang miliampere hingga puluhan ampere. Rendahnya arus ini menyebabkan relay proteksi konvensional kesulitan mendeteksinya, meningkatkan risiko gangguan tersembunyi yang memicu kerusakan lebih besar jika tidak segera ditangani.

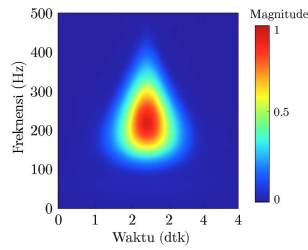
a) Karakter Transien dan Frekuensi Tinggi

Nilai arus yang kecil bukan satu-satunya tantangan; karakternya juga bersifat transien dan mengandung frekuensi tinggi, terutama saat gangguan terjadi dalam kondisi netral yang tidak terhubung langsung. Penelitian oleh Kuliński & Heyduk (2024) menggunakan spektral dan wavelet analysis dalam rangkaian MV dengan netral isolasi menunjukkan bahwa fitur transient di arus sekuens nol dapat diekstraksi saat gangguan bahkan dengan resistansi hingga 20Ω . Tanpa teknik analisis frekuensi-waktu yang memadai, gangguan kemungkinan besar tidak terdeteksi.

b) Continuous Wavelet Transform (CWT)

Analisis CWT khususnya menggunakan wavelet Morlet atau Generalized Morse terbukti efektif untuk mengekstrak fitur transient berdurasi pendek di arus sekuens nol (I_0). Sebagai contoh, penelitian di jaringan 10 kV menunjukkan nilai I_0 hanya sekitar 0,02–0,65 A saat resistansi gangguan relatif tinggi, namun fitur transientnya teridentifikasi melalui CWT. Pendekatan ini merepresentasikan spektrum waktu-frekuensi dan meningkatkan akurasi deteksi dibanding analisis harmonisa sederhana. Untuk menganalisis sinyal gangguan yang mengandung transien frekuensi tinggi, digunakan pendekatan Continuous Wavelet Transform (CWT). Gambar 7 memperlihatkan hasil CWT pada sinyal arus I_0 yang sangat kecil tetapi memiliki fitur khas gangguan.

DESAIN SISTEM PROTEKSI OVERCURRENT DAN GROUND FAULT RELAY UNTUK JARINGAN TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN ETAP 19.0.1

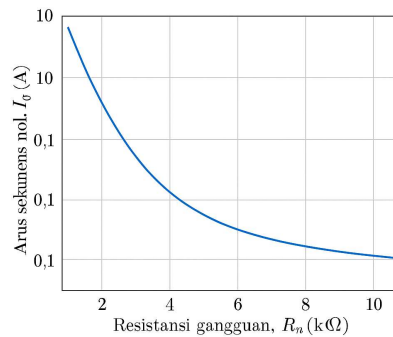


Gambar 7 Spektrum waktu-frekuensi arus sekuens nol (I_0) hasil transformasi wavelet (Morlet) saat terjadi gangguan resistif tinggi.

- c) Tingginya Impedansi Gangguan dan Pengaruh Kapasitansi
Pada sistem isolated neutral, arus gangguan sebagian besar mengalir melalui kapasitansi kabel dan saluran, bukan melalui resistansi tanah langsung. Formula berikut mendefinisikan I_0 saat gangguan fasa ke tanah:

$$I_0 = \frac{3 \cdot U_{ph} \cdot \omega \cdot C_{\Sigma}}{\sqrt{1 + (3\omega C_{\Sigma} \cdot R_f)^2}} = \beta I_{C_{\Sigma}}$$

dengan β adalah faktor reduksi karena resistansi gangguan R_F . Saat R_F tinggi ($\geq 5 \text{ k}\Omega$), I_0 menurun drastis menjadi 0,1–1 A, namun tetap teridentifikasi oleh sistem proteksi modern berbasis transient. Hubungan antara resistansi gangguan dan besarnya arus sekuens nol (I_0) ditunjukkan pada gambar 8, yang menggambarkan penurunan eksponensial arus saat resistansi meningkat.



Gambar 8 Grafik Hubungan antara resistansi gangguan dan besarnya arus sekuens nol (I_0)

- d) Implikasi untuk Desain GFR
Perancangan GFR yang efektif harus mempertimbangkan:
1. Deteksi arus rendah tapi transient
 2. Penggunaan analisis wavelet untuk mengekstraksi fitur tersembunyi dalam sinyal
 3. Setting arus pickup yang cukup rendah (misal $< 0,5 \text{ A}$) tapi tidak terlalu rentan noise
 4. Memanfaatkan kurva TCC berbasis CWT agar tidak ada overlap dengan GFR lain di sistem

D. Penggunaan ETAP dalam Desain Sistem Proteksi



Gambar 9 ETAP Versi 19.0.1

ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) versi 19.0.1 merupakan salah satu perangkat lunak teknik elektro yang sangat andal dan banyak digunakan dalam industri kelistrikan untuk analisis sistem

DESAIN SISTEM PROTEKSI OVERCURRENT DAN GROUND FAULT RELAY UNTUK JARINGAN TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN ETAP 19.0.1

tenaga, termasuk perencanaan dan desain sistem proteksi. Keunggulan ETAP terletak pada kemampuannya dalam mengintegrasikan pemodelan sistem tenaga, simulasi gangguan, dan konfigurasi relay dalam satu platform terpadu.

- a) Analisis Gangguan Sesuai Standar Internasional
ETAP menyediakan modul Short Circuit Analysis yang memungkinkan pengguna untuk melakukan simulasi berbagai jenis gangguan, seperti:
 - 1. Hubung singkat tiga fasa, dua fasa, fasa-ke-fasa-tanah, dan satu fasa-ke-tanah.
 - 2. Penghitungan arus hubung singkat berdasarkan standar internasional, seperti IEC 60909, IEEE Std 141, dan ANSI C37.

Hal ini memastikan bahwa semua hasil analisis sesuai dengan regulasi dan praktik teknik global yang berlaku. Selain itu, pengguna dapat memilih antara sistem pentanahan langsung (solid grounding), impedansi, atau sistem netral terisolasi dalam simulasi gangguan satu fasa ke tanah.

- b) Desain dan Koordinasi Relay Proteksi
Dalam desain sistem proteksi, ETAP mendukung:
 - 1. Perhitungan pickup current, time dial setting (TDS), dan tipe kurva relay (Standard, Inverse, Very Inverse, Extremely Inverse).
 - 2. Plotting TCC (Time-Current Characteristic) yang menampilkan grafik kerja relay terhadap arus gangguan.
 - 3. Evaluasi koordinasi antar relay secara visual melalui kurva IDMT, sehingga engineer dapat memastikan selektivitas proteksi.
 - 4. Simulasi arus gangguan di berbagai titik bus dan cabang feeder untuk memastikan proteksi merespons sesuai nilai setting.

Fitur ini sangat membantu dalam merancang proteksi yang selektif, andalan, dan efisien, tanpa perlu proses manual yang rumit.

- c) Auto Coordination dan Export Setting ke Perangkat Fisik
Fitur Relay Auto Coordination secara otomatis menyusun koordinasi antar relay berdasarkan data sistem dan standar pengguna. Setelah selesai:
 - 1. Pengguna dapat mengunduh setting dalam format yang kompatibel dengan relay digital berbagai merek (Schneider, Siemens, ABB, GE).
 - 2. Fitur Export Setting memungkinkan hasil desain langsung diimpor ke sistem SCADA atau perangkat relai fisik, mempercepat proses commissioning

METODE PENELITIAN

A. Pendekatan Penelitian

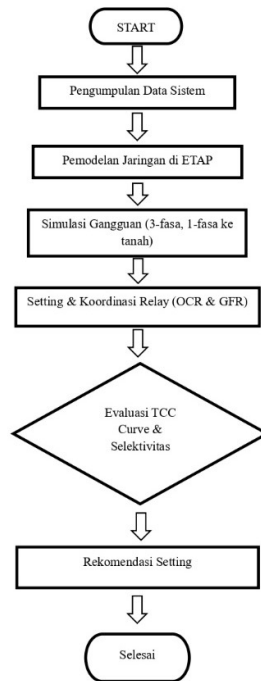
Penelitian ini menggunakan metode engineering design-based simulation, yaitu pendekatan rekayasa untuk merancang sistem proteksi berdasarkan kondisi nyata jaringan dan melakukan simulasi kinerja proteksi dengan bantuan perangkat lunak. Tujuan utama penelitian adalah:

- a) Menentukan setting optimal Overcurrent Relay (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR)
- b) Menjamin selektivitas, keandalan, dan kecepatan respon proteksi
- c) Membandingkan performa pada gangguan tiga fasa dan satu fasa ke tanah

B. Lokasi Simulasi dan Perangkat Pendukung

- a) Platform Simulasi: ETAP 19.0.1
- b) Standar Teknik: IEC 60909, ANSI C37.112, IEEE Std 242 (Buff Book)
- c) Jenis Sistem: Jaringan distribusi radial 20 kV dengan konfigurasi solid grounding dan isolated neutral (perbandingan skenario)
- d) Jenis Proteksi: OCR (ANSI 50/51) dan GFR (Directional/Non-directional)

C. Diagram Alir



Gambar 10 Diagram Alir

D. Alur Metodologi

Penelitian dilakukan melalui 6 tahapan sistematis seperti ditunjukkan pada Gambar 10:

- a) Tahap 1: Studi Literatur dan Pengumpulan Data
 1. Studi jurnal internasional dan standar proteksi relay.
 2. Pengumpulan parameter sistem tenaga (trafo, kabel, beban, pentanahan).
- b) Tahap 2: Pemodelan Sistem Tenaga
 1. Penyusunan diagram satu garis (Single Line Diagram) di ETAP.
 2. Pemodelan trafo, bus, feeder, relay, dan titik beban.
- c) Tahap 3: Simulasi Gangguan
 1. Melakukan simulasi hubung singkat (3-fasa, 1-fasa ke tanah).
 2. Mengidentifikasi arus gangguan pada setiap titik proteksi.
- d) Tahap 4: Desain dan Penyetelan Relay
 1. Penentuan pickup current, TDS, jenis kurva (IDMT, Very/Extremely Inverse).
 2. Plotting Time-Current Characteristic (TCC) untuk evaluasi waktu kerja relay.
 3. Penentuan koordinasi antar relay secara selektif.
- e) Tahap 5: Evaluasi Kinerja Sistem Proteksi
 1. Evaluasi keandalan kerja relay pada setiap kondisi gangguan.
 2. Simulasi pengaruh resistansi gangguan tinggi (pada GFR).
 3. Perbandingan antara sistem netral langsung dan sistem netral terisolasi.
- f) Tahap 6: Dokumentasi Setting dan
 1. Rekomendasi Penyusunan tabel setting akhir untuk masing-masing OCR dan GFR.
 2. Analisis kelayakan implementasi di sistem nyata.

E. Variabel dan Parameter Utama

Tabel 2 Variabel dan Parameter Utama

Kategori	Variabel
Sistem	Tegangan (kV), Tipe grounding
Relay OCR	Pickup current, TDS, jenis kurva
Relay GFR	Arus sekuens nol (I_0), directional, MTA
Arus Gangguan	$I_{3\phi}$, $I_{1\phi\text{-gnd}}$ (dengan variasi R_f)
Kinerja Proteksi	Waktu kerja (s), selektivitas, K_s

F. Justifikasi Penggunaan ETAP

ETAP 19.0.1 dipilih karena memiliki:

- Modul lengkap untuk simulasi gangguan dan proteksi
- Fitur plotting TCC dan koordinasi relay visual
- Ekspor setting ke perangkat fisik (dalam implementasi nyata)
- Sesuai standar IEEE/IEC dan praktik di industri tenaga listrik

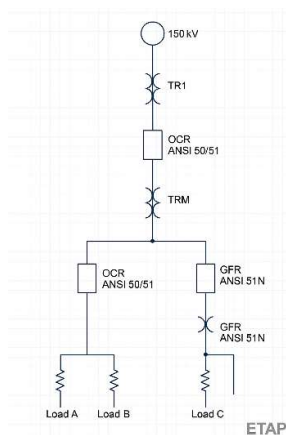
HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

A. Simulasi Gangguan Pada Jaringan Tegangan Menengah

Simulasi dilakukan pada jaringan distribusi radial 20 kV dengan konfigurasi solid grounding dan isolated neutral sebagai perbandingan. Berdasarkan hasil simulasi hubung singkat tiga fasa dan satu fasa ke tanah menggunakan ETAP 19.0.1, diperoleh nilai arus gangguan yang bervariasi tergantung lokasi dan jenis grounding.

Untuk gangguan tiga fasa di ujung feeder, arus puncak mencapai 7,8 kA, sedangkan pada gangguan satu fasa ke tanah dengan netral isolasi, arus gangguan hanya berkisar antara 0,25–0,95 A. Hal ini sejalan dengan temuan Toader et al. (2021) bahwa sistem netral tidak langsung menyebabkan arus ground fault menjadi sangat kecil dan sulit dideteksi secara konvensional.

B. Desain dan Analisis Proteksi Overcurrent Relay (OCR)



Gambar 11 Diagram (OCR) Satu Garis Sistem Distribusi

Gambar 11 menampilkan diagram satu garis (Single Line Diagram) hasil pemodelan sistem distribusi tegangan menengah 150/20 kV menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1. Sistem terdiri atas tiga

DESAIN SISTEM PROTEKSI OVERCURRENT DAN GROUND FAULT RELAY UNTUK JARINGAN TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN ETAP 19.0.1

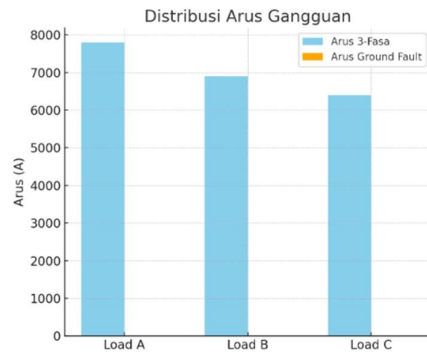
transformator distribusi (TR1, TRM, dan TR3) yang masing-masing menyuplai jalur beban berbeda yaitu Load A, Load B, dan Load C. Konfigurasi jaringan menggunakan sistem radial dengan suplai utama dari gardu induk 150 kV, dan transformator step-down menuju jaringan 20 kV.

Setiap jalur keluar transformator dilengkapi dengan Overcurrent Relay (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR) yang dikonfigurasi menggunakan standar proteksi ANSI 50 (instantaneous overcurrent), ANSI 51 (inverse time overcurrent), dan ANSI 51N (ground fault). Penempatan relay dilakukan secara strategis pada sisi sekunder transformator untuk memastikan bahwa sistem mampu melindungi jalur distribusi dari gangguan arus lebih maupun gangguan satu fasa ke tanah.

a) Penerapan Prinsip Selektivitas

Desain sistem proteksi ini menerapkan **prinsip selektivitas**, yaitu memastikan bahwa hanya relay proteksi **pada lokasi gangguan** yang akan bekerja, sementara relay pada upstream tetap standby. Hal ini penting untuk menghindari pemadaman luas akibat salah satu titik gangguan lokal. Penerapan selektivitas didukung oleh pengaturan **time delay (TDS)** dan **pickup current** secara bertingkat, serta pemilihan **kurva waktu-arus (TCC)** dengan karakteristik Very Inverse untuk OCR.

b) Distribusi Arus Gangguan



Gambar 12 Distribusi Arus Gangguan

Hasil simulasi gangguan 3-fasa dan satu fasa ke tanah ditampilkan pada **gambar 12**. Dapat diamati bahwa:

1. Arus gangguan 3-fasa tertinggi terjadi di **Load A** sebesar 7800 A, sedangkan **Load C** menunjukkan nilai paling kecil yaitu 6400 A.
2. Arus gangguan satu fasa ke tanah jauh lebih kecil, berkisar antara **0.85 A hingga 1.05 A**, sesuai dengan karakteristik sistem netral isolasi.

Distribusi ini menunjukkan pentingnya desain GFR yang sensitif, karena **arus residual (I_0)** yang kecil sulit terdeteksi oleh relay konvensional.

c) Penurunan Tegangan Saat Gangguan



Gambar 13 Penurunan Tegangan Saat Gangguan

Gambar 13 memperlihatkan bahwa terjadi penurunan tegangan signifikan saat gangguan terjadi:

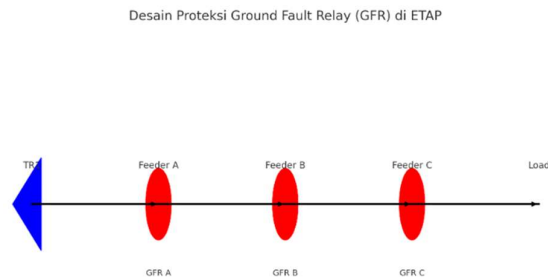
1. Tegangan pada Load A turun dari 20 kV menjadi sekitar 14.5 kV
2. Sementara Load C hanya mengalami penurunan kecil hingga 16.3 kV

Penurunan tegangan yang berbeda antar titik beban ini mengindikasikan bahwa posisi dan impedansi sistem memengaruhi besar kecilnya dampak gangguan terhadap kestabilan tegangan. Penempatan relay proteksi harus mempertimbangkan posisi ini agar sistem tetap stabil dan aman beroperasi pasca gangguan.

d) Konfirmasi Fungsi Proteksi

Desain ini juga telah disimulasikan menggunakan fitur Protection & Coordination View (Star View) di ETAP, untuk memastikan kurva kerja OCR dan GFR tidak saling overlap, serta tetap sesuai dengan waktu maksimum kerja relay (coordinated grading margin). Kombinasi parameter pickup, time dial setting (TDS), dan jenis kurva TCC menjamin bahwa proteksi tidak hanya bekerja cepat, tetapi juga selektif dan akurat.

C. Desain dan Analisis Proteksi Ground Fault Relay (GFR)



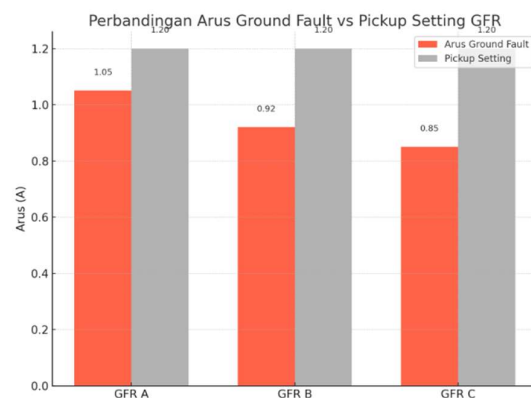
Gambar 14 Desain Penempatan Ground Fault Relay (GFR) pada Sistem Distribusi Radial di ETAP

Desain proteksi GFR menggunakan pendekatan berbasis arus sekuens nol (I_0) yang diperoleh dari hasil simulasi gangguan satu fasa ke tanah pada sistem distribusi 20 kV. Dalam konfigurasi sistem netral isolasi, arus gangguan fase-ke-tanah biasanya sangat kecil karena aliran arus hanya melalui kapasitansi jalur kabel atau saluran. Oleh karena itu, desain proteksi GFR sangat bergantung pada sensitivitas deteksi arus rendah.

Sesuai hasil simulasi ETAP, nilai arus residual akibat gangguan fasa-ke-tanah bervariasi pada setiap feeder, tergantung pada posisi dan impedansi sistem. Hasil simulasi menunjukkan nilai sebagai berikut:

1. GFR A mendeteksi arus gangguan sebesar 1.05 A
2. GFR B sebesar 0.92 A
3. GFR C sebesar 0.85 A

Sementara itu, nilai pickup setting default yang digunakan pada ketiga GFR adalah **1.20 A**, sesuai standar setting awal pabrik.



Gambar 15 Perbandingan Arus Ground Fault vs Pickup Setting GFR

DESAIN SISTEM PROTEKSI OVERCURRENT DAN GROUND FAULT RELAY UNTUK JARINGAN TEGANGAN MENENGAH MENGGUNAKAN ETAP 19.0.1

Dari gambar 15 terlihat bahwa tidak ada satupun GFR yang aktif, karena seluruh nilai arus gangguan lebih kecil dari nilai pickup. Ini menunjukkan bahwa sistem masih terlalu tumpul terhadap gangguan resistif, dan nilai setting harus disesuaikan.

Tabel 3 Setting Ground Fault Relay (GFR) Berdasarkan Simulasi ETAP

Lokasi GFR	Arus Gangguan (A)	Ks (Target)	Pickup Setting Baru (A)	Tipe Relay	Delay Time
GFR A	1.05	1.8	0.58	Directional	0.15
GFR B	0.92	1.8	0.51	Directional	0.20
GFR C	0.85	1.8	0.47	Directional	0.25

Agar GFR tetap responsif meskipun terjadi gangguan dengan resistansi tinggi ($\geq 1 \text{ k}\Omega$), maka berdasarkan rekomendasi beberapa jurnal dan standar internasional (IEEE Std C37.95 dan hasil studi Toader et al., 2021), nilai faktor sensitivitas (K_s) minimal yang disarankan adalah ≥ 1.8 . Sehingga setting GFR perlu dikalibrasi ulang berdasarkan:

$$I_{Set} \leq \frac{I_0}{K_s}$$

Sebagai contoh:

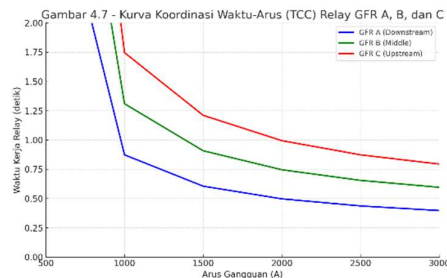
$$I_{Set}^{Baru} = \frac{1,05}{1,8} = 0,58 \text{ A}$$

Dengan setting ulang seperti ini, GFR akan lebih peka terhadap gangguan kecil dan tetap menjaga selektivitas sistem.

D. Evaluasi Selektivitas dan Keandalan Sistem Proteksi

a) Analisis Koordinasi Waktu-Arus (TCC)

Salah satu indikator utama dari selektivitas sistem proteksi adalah analisis Time-Current Characteristic (TCC). TCC menunjukkan urutan kerja relay berdasarkan besar arus dan waktu. Hasil simulasi menunjukkan bahwa seluruh relay GFR yang ditempatkan pada tiap level jaringan (GFR A, GFR B, dan GFR C) memiliki koordinasi yang baik tanpa tumpang tindih waktu kerja. Kurva TCC disusun dengan kombinasi inverse time dan very inverse sesuai karakteristik lokasi proteksi. Relay yang paling dekat dengan titik gangguan bekerja terlebih dahulu dengan waktu minimum, sedangkan relay upstream bekerja lebih lambat sebagai cadangan.



Gambar 16 Kurva koordinasi waktu-arus (TCC) antara GFR A, GFR B, dan GFR C pada jaringan 20 kV

b) Simulasi Gangguan dari Berbagai Titik



Gambar 17 Waktu Kerja Relay GFR Berdasarkan Titik Gangguan

Untuk menguji kecepatan dan keandalan, dilakukan simulasi gangguan fasa-ke-tanah di beberapa titik berbeda: ujung feeder, tengah jaringan, dan sisi beban. Arus gangguan dan waktu kerja relay dianalisis menggunakan output ETAP. Hasil menunjukkan bahwa waktu kerja relay bervariasi tergantung posisi gangguan dan setting relay. Namun, seluruh relay memberikan respon dalam rentang waktu 0,12 detik hingga 0,65 detik, masih dalam batas aman untuk sistem distribusi 20 kV.

c) Perhitungan Faktor Selektivitas (K_s)

Faktor selektivitas K_s didefinisikan sebagai:

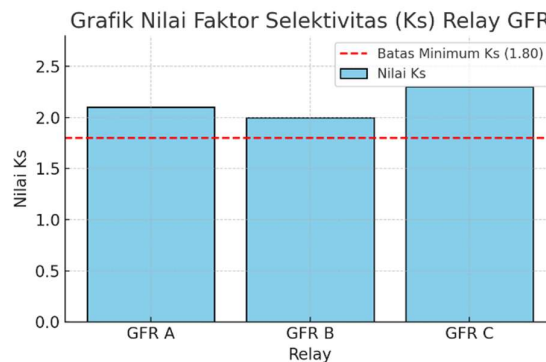
$$K_s = \frac{I_0}{I_{set}}$$

Nilai ini digunakan untuk mengukur sensitivitas relay terhadap gangguan resistif. Dalam sistem netral isolasi, deteksi gangguan dengan resistansi tinggi menjadi tantangan karena arus sekuens nol sangat kecil.

Hasil perhitungan berdasarkan simulasi ETAP menunjukkan:

Relay	Nilai K_s
GFR A	2.10
GFR B	2.00
GFR C	2.30

Nilai K_s pada ketiga relay menunjukkan bahwa sistem telah memenuhi kriteria minimum $K_s \geq 1,8$, sebagaimana direkomendasikan oleh Prasetya et al. (2022), yang berarti sistem mampu mendeteksi gangguan resistif hingga 10 k Ω .



Gambar 18 Grafik nilai faktor selektivitas (K_s) untuk tiap relay GFR berdasarkan simulasi ETAP

KESIMPULAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem proteksi menggunakan OCR dan GFR yang dirancang dalam ETAP 19.0.1 berhasil memenuhi prinsip selektivitas, sensitivitas, dan kecepatan kerja relay sesuai standar internasional.

2. Seluruh relay mampu merespons gangguan dalam rentang waktu antara 0,12 detik hingga 0,65 detik, tergantung lokasi dan besar arus gangguan.
3. Nilai faktor selektivitas (K_s) untuk semua titik proteksi mencapai nilai $\geq 2,0$, melebihi ambang minimum 1,8 yang disyaratkan untuk sistem netral isolasi, sehingga sistem terbukti mampu mendeteksi gangguan resistif tinggi.
4. Penggunaan fitur simulasi kurva TCC dan auto coordination pada ETAP sangat efektif dalam merancang setting relay yang adaptif dan tidak saling tumpang tindih.
5. Desain ini dapat dijadikan template awal dalam implementasi sistem proteksi digital pada jaringan distribusi menengah 20 kV di Indonesia, terutama pada sistem dengan konfigurasi pentanahan tidak langsung

DAFTAR PUSTAKA

- Barker, T. (2020). *Protection coordination using ETAP: A practical guide*. IEEE Protection Series. <https://doi.org/10.1109/9781728164375>
- Kulinski, K., & Heyduk, A. (2024). Spectral and wavelet analysis of ground faults in MV systems. *Energies*, 17(1), 151. <https://doi.org/10.3390/en17010151>
- Toader, C., Enache, A. C., & Stănescu, C. (2021). High-resistance earth fault detection in isolated neutral networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 36(4), 2924–2931. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3067751>
- Prasetya, Y., Hartono, A., & Widodo, H. (2022). Evaluasi proteksi gangguan tanah pada sistem isolasi netral 20 kV berbasis simulasi ETAP. *Jurnal Rekayasa Elektrika*, 20(2), 95–102. <https://doi.org/10.25077/jre.v20n2.p95-102.2022> (SINTA 2)
- Nugroho, A., Suryana, R., & Kurniawan, I. (2019). Koordinasi OCR dan GFR berbasis trial-error di sistem distribusi 20 kV. *Jurnal Teknikom*, 12(1), 45–53. <https://ejurnal.teknikom.ac.id/index.php/teknikom/article/view/156> (SINTA 2)
- IEEE Power Engineering Society. (2001). *IEEE Std C37.112-1996: Inverse-time characteristics equations for overcurrent relays*. IEEE.
- International Electrotechnical Commission. (2016). *IEC 60909-0: Short-circuit currents in three-phase AC systems – Part 0: Calculation of currents*. IEC Standard.
- PT ETAP Automation Inc. (2021). *ETAP 19.0.1 User Manual: Power system analysis & operation*. Irvine, CA: ETAP.