



Koordinasi Relay Proteksi Gangguan Hubung Singkat Menggunakan ETAP

Matthew Steven Tarigan

Universitas Negeri Medan

Rizky Wiyugo

Universitas Negeri Medan

Alamat: Jl. William Iskandar Ps. V, Kenangan Baru, Kec. Percut Sei Tuan, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara 20221

Korespondensi penulis: matthew.5223230029@mhs.unimed.ac.id

Abstract. *In electrical power systems, short circuit faults are one of the main causes of equipment damage and widespread power outages when the protection system fails to operate selectively. Therefore, proper coordination between the Over Current Relay (OCR) and Ground Fault Relay (GFR) is essential to ensure reliable and effective system protection. This study aims to analyze the coordination of protection relays against short circuit faults in a 20 kV distribution network using the ETAP software. The research stages include modeling the power system through a single-line diagram, performing load flow analysis, short circuit fault analysis, and relay coordination simulation. The simulation results show that in the initial condition (existing setting), the coordination curves of the relays overlap, which may cause incorrect relay operation sequences. After performing relay resetting in ETAP, the coordination curves between the OCR and GFR no longer overlap, and the operating time complies with the IEEE 242 standard, ranging from 0.2 to 0.4 seconds. Thus, the resulting protection coordination meets the selectivity and reliability criteria, minimizing outage areas and effectively protecting equipment from the impacts of short circuit faults*

Keywords: *ETAP, Over Current Relay (OCR), Short Circuit Fault, Protection Coordination.*

Abstrak. Pada sistem tenaga listrik, gangguan hubung singkat merupakan salah satu penyebab utama terjadinya kerusakan peralatan dan pemadaman listrik yang meluas apabila sistem proteksi tidak bekerja secara selektif. Oleh karena itu, diperlukan koordinasi yang tepat antara rele arus lebih (Over Current Relay/OCR) dan rele gangguan tanah (Ground Fault Relay/GFR) agar sistem proteksi mampu bekerja sesuai fungsinya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis koordinasi relay proteksi terhadap gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi 20 kV menggunakan perangkat lunak ETAP. Tahapan penelitian meliputi pemodelan sistem tenaga dalam bentuk *single line diagram*, analisis aliran daya (*load flow*), analisis gangguan hubung singkat, serta simulasi koordinasi relay. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada kondisi awal (*setting existing*), kurva koordinasi antar relay masih saling berpotongan sehingga dapat menyebabkan kesalahan urutan kerja proteksi. Setelah dilakukan *resetting* relay pada ETAP, kurva koordinasi antara OCR dan GFR tidak lagi tumpang tindih dengan waktu kerja sesuai standar IEEE 242, yaitu 0,2–0,4 detik. Dengan demikian, koordinasi proteksi yang dihasilkan telah memenuhi kriteria selektivitas dan keandalan sistem, sehingga mampu meminimalkan area padam dan melindungi peralatan dari dampak gangguan hubung singkat

Kata kunci: ETAP, Over Current Relay (OCR), Gangguan Hubung Singkat, Koordinasi Proteksi.

LATAR BELAKANG

Energi listrik memiliki peranan penting dalam kehidupan manusia, terutama dalam menunjang aktivitas di sektor industri, ekonomi, dan sosial. Seiring dengan meningkatnya kebutuhan listrik setiap tahunnya, sistem distribusi tenaga listrik dituntut untuk bekerja secara andal, efisien, dan aman dalam menyalurkan energi dari sumber pembangkit ke konsumen. Namun dalam proses penyaluran tersebut, sering terjadi gangguan hubung singkat yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan, penurunan tegangan, bahkan pemadaman listrik secara meluas apabila sistem proteksi tidak bekerja dengan baik.

Salah satu cara untuk menjaga keandalan sistem distribusi adalah dengan menerapkan sistem proteksi arus lebih (Over Current Protection) yang menggunakan relay arus lebih (Over Current Relay/OCR) sebagai alat pendeteksi gangguan. OCR berfungsi untuk merespons kenaikan arus yang melebihi batas nominal akibat adanya gangguan, baik antar fasa maupun ke tanah, dengan memberikan perintah pemutusan pada pemutus tenaga (*circuit breaker*) agar bagian jaringan yang terganggu dapat segera diisolasi.

Agar sistem proteksi bekerja secara selektif, koordinasi antar relay perlu diperhatikan. Relay yang paling dekat dengan titik gangguan harus bekerja terlebih dahulu, sedangkan relay di sisi hulu bertugas sebagai proteksi cadangan (*backup*). Tanpa koordinasi yang tepat, relay dapat

bekerja tidak sesuai urutan, menyebabkan pemutusan yang tidak perlu dan memperluas area pemadaman.

Dalam penelitian ini, dilakukan analisis koordinasi relay proteksi arus lebih (OCR) terhadap gangguan hubung singkat pada jaringan distribusi 20 kV menggunakan perangkat lunak Electrical Transient Analyzer Program (ETAP). ETAP digunakan untuk memodelkan sistem dalam bentuk *single line diagram*, melakukan simulasi arus hubung singkat, serta mengatur *time-current characteristic (TCC)* antar relay agar tercapai koordinasi yang optimal. Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh hasil penyetelan (*setting*) relay yang tepat sehingga sistem proteksi dapat bekerja cepat, selektif, dan andal sesuai dengan standar **IEEE 242**.

Metode Penelitian

A. Sistem Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan suatu kesatuan yang terdiri dari beberapa komponen yang saling berhubungan untuk menghasilkan, menyalurkan, dan mendistribusikan energi listrik kepada konsumen. Secara umum, sistem tenaga listrik terdiri dari tiga bagian utama, yaitu:

1. Sistem Pembangkit (Generating System)
Merupakan bagian yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik dari berbagai sumber energi primer, seperti air (PLTA), uap (PLTU), gas (PLTG), diesel (PLTD), atau energi terbarukan seperti surya dan angin. Energi listrik yang dihasilkan pada pembangkit biasanya memiliki tegangan relatif rendah.
2. Sistem Transmisi (Transmission System)
Energi listrik dari pembangkit kemudian dinaikkan tegangannya oleh transformator step-up agar dapat ditransmisikan ke jarak yang jauh dengan rugi daya yang minimal. Sistem transmisi biasanya bekerja pada tegangan tinggi hingga ekstra tinggi, seperti 70 kV, 150 kV, atau 500 kV.
3. Sistem Distribusi (Distribution System)
Setelah melalui jaringan transmisi, energi listrik diturunkan tegangannya menggunakan transformator step-down di gardu induk untuk disalurkan ke pelanggan melalui jaringan distribusi. Sistem distribusi terdiri dari dua jenis, yaitu:
 - Distribusi Tegangan Menengah (20 kV), yang menyalurkan daya dari gardu induk ke gardu distribusi atau gardu hubung.
 - Distribusi Tegangan Rendah (380/220 V), yang menyalurkan energi ke konsumen akhir seperti rumah, perkantoran, dan industri kecil.

Kinerja sistem tenaga listrik yang baik sangat bergantung pada keandalan sistem proteksi dalam mencegah dan mengatasi gangguan yang dapat mengakibatkan kerusakan peralatan atau padamnya sistem secara luas.

B. Prinsip Kerja Over Current Relay (OCR)

Over Current Relay (OCR) adalah perangkat proteksi yang bekerja berdasarkan besarnya arus listrik yang mengalir dalam suatu sistem. Relay ini akan memberikan perintah pemutusan (trip) pada pemutus tenaga (*circuit breaker*) apabila arus yang mengalir melebihi nilai setting tertentu selama periode waktu tertentu.

Prinsip kerja OCR dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Dalam kondisi normal, arus yang mengalir melalui relay masih berada di bawah batas setting, sehingga relay tidak bekerja.
2. Saat terjadi gangguan (misalnya hubung singkat), arus meningkat melebihi batas yang telah ditetapkan (*Iset*).
3. OCR kemudian mendeteksi kenaikan arus tersebut dan mengaktifkan mekanisme pemutusan.
4. Setelah waktu tertentu yang telah diatur sesuai karakteristik waktu arus (*Time Current Characteristic/TCC*), relay mengirimkan sinyal untuk membuka *circuit breaker* dan memutus bagian jaringan yang terganggu.

OCR memiliki beberapa karakteristik kerja berdasarkan jenis kurjanya, antara lain:

- **Standard Inverse**

- **Very Inverse**
- **Extremely Inverse**

Pemilihan jenis kurva disesuaikan dengan karakteristik sistem dan waktu kerja relay lain agar koordinasi dapat tercapai.

C. Jenis Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat (*short circuit fault*) adalah kondisi abnormal pada sistem tenaga listrik ketika terjadi hubungan langsung antara dua titik yang berbeda potensial, sehingga arus listrik meningkat secara tiba-tiba melebihi nilai normalnya. Gangguan ini dapat menyebabkan kerusakan peralatan, penurunan tegangan, dan gangguan stabilitas sistem.

Jenis-jenis gangguan hubung singkat pada sistem tiga fasa antara lain:

1. Gangguan Tiga Fasa (3-Phase Fault)

Terjadi ketika ketiga penghantar fasa (R, S, dan T) saling berhubungan langsung. Gangguan ini menghasilkan arus gangguan terbesar dan merupakan kondisi paling berat bagi sistem tenaga.

2. Gangguan Dua Fasa (Double Line-to-Line Fault)

Terjadi ketika dua penghantar fasa saling bersentuhan, misalnya fasa R dan S. Gangguan ini menghasilkan arus yang lebih kecil dibandingkan gangguan tiga fasa.

3. Gangguan Satu Fasa ke Tanah (Single Line-to-Ground Fault)

Terjadi ketika satu penghantar fasa terhubung langsung ke tanah, misalnya fasa R ke tanah. Jenis gangguan ini paling sering terjadi pada sistem distribusi 20 kV, terutama akibat isolasi yang rusak atau pengaruh cuaca.

D. Konsep Koordinasi Relay dan Standar IEEE 242

Koordinasi relay adalah proses pengaturan waktu kerja (*time setting*) dan arus kerja (*current setting*) antar relay agar sistem proteksi bekerja secara selektif. Artinya, relay yang terdekat dengan titik gangguan harus bekerja terlebih dahulu untuk mengisolasi gangguan, sedangkan relay di sisi hulu berfungsi sebagai cadangan (*backup*).

Koordinasi yang baik ditandai dengan tidak adanya kurva karakteristik waktu relay yang saling tumpang tindih, serta adanya selang waktu kerja (*grading time*) antara relay utama dan relay cadangan. Menurut standar IEEE 242, nilai *grading time* ideal berada pada kisaran 0,2 hingga 0,4 detik, tergantung pada jenis peralatan dan tingkat keandalan sistem.

E. Pengenalan ETAP

ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk analisis, perencanaan, dan simulasi sistem tenaga listrik. ETAP dapat digunakan untuk berbagai jenis analisis, seperti:

- Analisis aliran daya (*Load Flow Analysis*)
- Analisis hubung singkat (*Short Circuit Analysis*)
- Analisis kestabilan sistem (*Transient Stability Analysis*)
- Koordinasi relay proteksi (*Protection Coordination*)
- Analisis harmonisa (*Harmonic Analysis*)

Dalam penelitian ini, ETAP digunakan untuk membuat model jaringan tenaga listrik dalam bentuk diagram satu garis (*Single Line Diagram*), menghitung arus gangguan hubung singkat, dan menampilkan kurva koordinasi relay (*Time-Current Coordination Curve*). Melalui simulasi ini, nilai setting relay dapat dioptimalkan agar sistem proteksi bekerja cepat, selektif, dan sesuai dengan standar.

HASIL DAN PEMBAHASAN

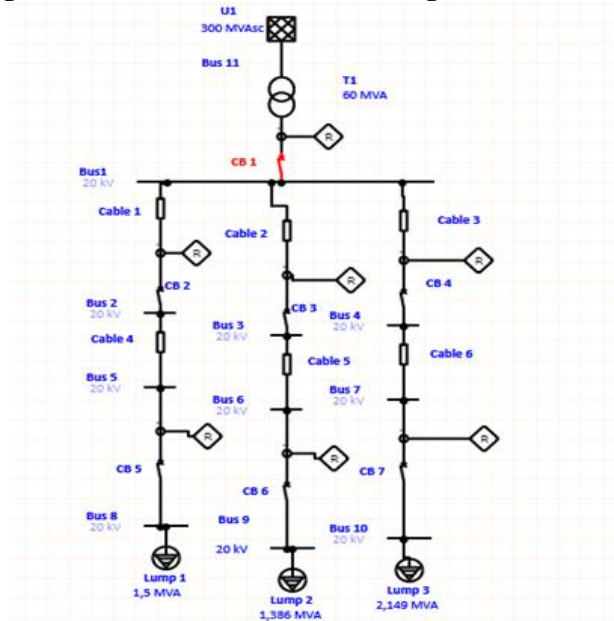
A. Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada sistem distribusi tenaga listrik 20 kV yang dimodelkan menggunakan perangkat lunak **ETAP (Electrical Transient Analyzer Program)**. Sistem ini merepresentasikan konfigurasi jaringan distribusi radial, di mana sumber tenaga listrik disalurkan dari bus utama menuju beberapa penyulang yang terhubung ke beban-beban distribusi.

Sebagai acuan, data jaringan diambil berdasarkan karakteristik umum sistem distribusi menengah milik PLN, seperti yang digunakan pada Gardu Hubung Lancang Garam atau PLN

ULP Ngunut. Sistem ini terdiri atas satu transformator utama dengan kapasitas 60 MVA, beberapa bus 20 kV, serta tiga penyulang utama yang masing-masing menyuplai beban dengan kapasitas berbeda.

B. Single Line Diagram Sistem Distribusi 20 kV dengan Data Teknis



Gambar 3.1 Gambar Diagram Garis

Gambar di atas menunjukkan model sistem distribusi tenaga listrik 20 kV yang dibuat menggunakan perangkat lunak ETAP, lengkap dengan data komponen seperti panjang kabel, impedansi, daya beban, serta kapasitas transformator. Diagram ini menjadi dasar untuk analisis aliran daya (load flow), gangguan hubung singkat (short circuit), dan koordinasi proteksi OCR.

1) Sumber dan Transformator

Sumber sistem berupa jaringan tenaga listrik 20 kV dengan kapasitas hubung singkat sebesar **300 MVA**, yang menggambarkan kekuatan sistem terhadap arus gangguan maksimum.

- Transformator daya memiliki kapasitas 60 MVA, dengan tegangan 20/20 kV dan impedansi 10%, serta rasio $R/X = 0,022$.
- Transformator dihubungkan antara Bus11 (sumber utama) dan Bus1 (bus distribusi utama).
- CB1 berfungsi sebagai pemutus utama (main circuit breaker) antara sisi sekunder transformator dan bus utama distribusi.

2) Bus dan Penyulang

Sistem terdiri dari 11 bus, seluruhnya bertegangan 20 kV, dengan konfigurasi radial dari Bus11 (sumber utama) menuju Bus10 (ujung sistem). Fungsi masing-masing bus adalah sebagai berikut:

- **Bus11** : Sebagai sumber utama sistem distribusi.
- **Bus1** : Bus utama yang menerima daya dari transformator dan membagi ke tiga penyulang utama.
- **Bus2** : Titik awal penyulang 1, menyalurkan daya menuju Bus5 dan Bus8.
- **Bus3** : Titik awal penyulang 2, menyalurkan daya menuju Bus6 dan Bus9.
- **Bus4** : Titik awal penyulang 3, menyalurkan daya menuju Bus7 dan Bus10.
- **Bus5** : Bus antara pada penyulang 1, menyalurkan daya ke arah beban.
- **Bus6** : Bus antara pada penyulang 2, menyalurkan daya ke arah beban.
- **Bus7** : Bus antara pada penyulang 3, menyalurkan daya ke arah beban.
- **Bus8** : Bus ujung pada penyulang 1, terhubung langsung ke beban Lump1.
- **Bus9** : Bus ujung pada penyulang 2, terhubung langsung ke beban Lump2.
- **Bus10** : Bus ujung pada penyulang 3, terhubung langsung ke beban Lump3.

3) Circuit Breaker (CB) dan Relay Proteksi

Setiap penyulang dilengkapi dengan **Circuit Breaker (CB)** dan **Over Current Relay (OCR)** sebagai proteksi terhadap arus lebih dan gangguan hubung singkat.

Posisi dan fungsi CB adalah sebagai berikut:

- **CB1** : Antara T1 dan Bus1 → proteksi utama sisi sekunder trafo.
- **CB2** : Antara Bus1 dan Bus2 → proteksi awal penyulang 1.
- **CB3** : Antara Bus1 dan Bus3 → proteksi awal penyulang 2.
- **CB4** : Antara Bus1 dan Bus4 → proteksi awal penyulang 3.
- **CB5** : Antara Bus5 dan Bus8 → proteksi beban Lump1.
- **CB6** : Antara Bus6 dan Bus9 → proteksi beban Lump2.
- **CB7** : Antara Bus7 dan Bus10 → proteksi beban Lump3.
- **CB8–CB11** : Proteksi cadangan dan interkoneksi tambahan jika diperlukan.

Koordinasi antar relay diatur agar relay yang paling dekat dengan titik gangguan bekerja lebih cepat daripada relay di sisi hulu, sehingga sistem proteksi bekerja **selektif dan andal**.

4) Kabel Distribusi

Semua jalur antar bus menggunakan **kabel 20 kV** dengan panjang **100 meter per segmen**. Nilai resistansi (R_1) sebesar **1 Ω /km**, dan reaktansi (X_1) sebesar **1 Ω /km**.

Jalur utama koneksi antarbus adalah:

- Bus11 ke Bus1
- Bus1 ke Bus2
- Bus2 ke Bus5
- Bus5 ke Bus8
- Bus1 ke Bus3
- Bus3 ke Bus6
- Bus6 ke Bus9
- Bus1 ke Bus4
- Bus4 ke Bus7
- Bus7 ke Bus10

5) Beban Sistem

Sistem distribusi memiliki 11 beban utama yang semuanya beroperasi pada tegangan 20 kV, dengan faktor daya 0,85. Rinciannya sebagai berikut:

- **Lump1** : 0,50 MVA → arus nominal 14,4 A
- **Lump2** : 0,55 MVA → arus nominal 15,8 A
- **Lump3** : 0,60 MVA → arus nominal 17,2 A
- **Lump4** : 0,65 MVA → arus nominal 18,6 A
- **Lump5** : 0,70 MVA → arus nominal 20,0 A
- **Lump6** : 0,75 MVA → arus nominal 21,5 A
- **Lump7** : 0,80 MVA → arus nominal 22,9 A
- **Lump8** : 0,85 MVA → arus nominal 24,3 A
- **Lump9** : 0,90 MVA → arus nominal 25,8 A
- **Lump10** : 0,95 MVA → arus nominal 27,2 A
- **Lump11** : 1,00 MVA → arus nominal 28,7 A

Beban-beban tersebut digunakan sebagai titik analisis dalam simulasi **load flow** dan **short circuit** untuk mengetahui performa distribusi daya serta keakuratan sistem proteksi.

6) Konfigurasi Sistem

Sistem distribusi ini berbentuk radial satu arah (single radial system), di mana daya mengalir dari sumber (Bus11) ke bus-bus beban tanpa hubungan silang antarpenyulang.

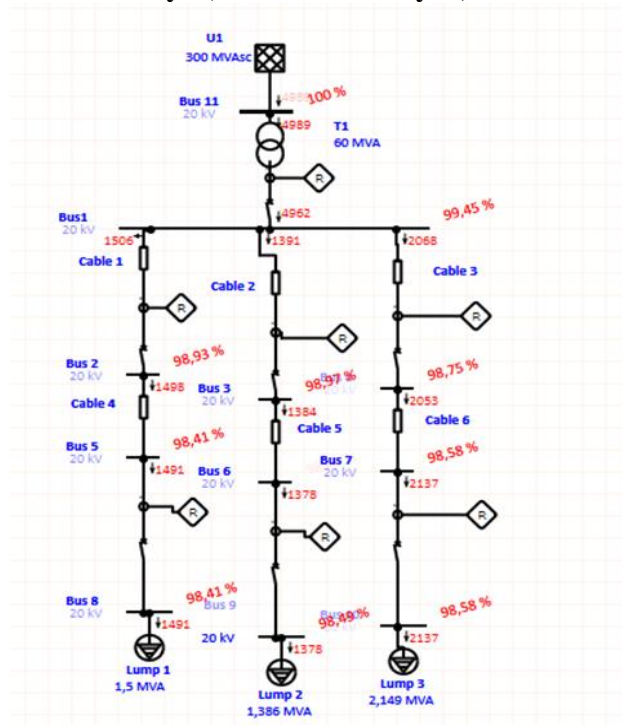
- Keuntungan konfigurasi radial ini meliputi:

1. Struktur sederhana dan mudah dianalisis.
2. Biaya investasi lebih rendah dibanding sistem loop.
3. Koordinasi relay OCR dapat dilakukan secara sistematis dan efisien.

Sistem ini digunakan untuk:

1. Analisis aliran daya (load flow).
2. Analisis gangguan hubung singkat (short circuit).
3. Penentuan setting relay OCR (I_{pickup} dan TMS).
4. Analisis koordinasi proteksi (TCC) dengan waktu kerja antarrelay (grading time) sekitar 0,2–0,4 detik sesuai **IEEE 242** dan **IEC 60255**.

C. Hasil Simulasi Aliran Daya (Load Flow Analysis)



Gambar 3.2 Hasil Load Flow

Simulasi aliran daya (Load Flow) dilakukan menggunakan perangkat lunak ETAP pada sistem distribusi 20 kV dengan konfigurasi radial 11 bus. Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui kondisi sistem dalam keadaan normal, meliputi distribusi daya aktif, daya reaktif, arus, dan tegangan pada setiap bus ketika sistem beroperasi tanpa adanya gangguan. Parameter utama yang digunakan dalam simulasi ini meliputi:

- Tegangan nominal sistem sebesar 20 kV.
- Frekuensi sistem 50 Hz.
- Kapasitas transformator 60 MVA.
- Jumlah bus sebanyak 11 bus.
- Jumlah beban sebanyak 11 beban dengan total daya sekitar 8,55 MVA dan faktor daya 0,85 lagging.
- Konfigurasi sistem berbentuk **radial**, di mana aliran daya hanya mengalir dari sumber menuju beban tanpa adanya percabangan balik.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan pada setiap bus mengalami sedikit penurunan dari sumber ke arah beban akibat adanya rugi daya pada saluran. Tegangan tertinggi terdapat pada **Bus11** yang berfungsi sebagai sumber utama, sedangkan tegangan terendah terdapat pada bus ujung seperti **Bus8**, **Bus9**, dan **Bus10**. Nilai tegangan pada seluruh bus masih berada dalam batas toleransi $\pm 5\%$ dari tegangan nominal 20 kV sesuai **SPLN No. 1 Tahun 1995**, yaitu sekitar **98,3%–99,5%** dari nilai nominal. Kondisi

ini menunjukkan bahwa sistem distribusi bekerja secara stabil dan efisien, tanpa mengalami penurunan tegangan yang signifikan.

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa arus dan daya yang mengalir pada setiap penyulang sesuai dengan kapasitas beban yang disuplai, yaitu:

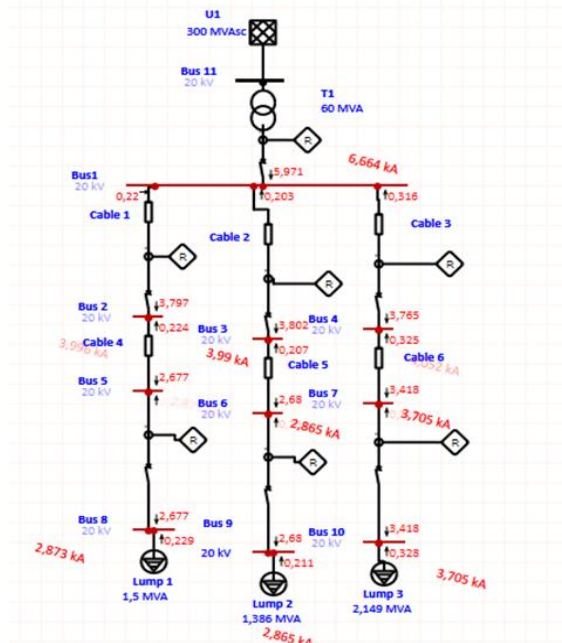
- **Penyulang 1 (Lump1–Lump4)** memiliki daya total sekitar **2,3 MVA** dengan arus beban sekitar **67 A**.
- **Penyulang 2 (Lump5–Lump8)** memiliki daya total sekitar **2,9 MVA** dengan arus beban sekitar **85 A**.
- **Penyulang 3 (Lump9–Lump11)** memiliki daya total sekitar **3,3 MVA** dengan arus beban sekitar **97 A**.

Dari hasil tersebut, arus terbesar terdapat pada penyulang 3 karena melayani beban dengan kapasitas daya paling tinggi.

- Secara umum, hasil simulasi aliran daya memperlihatkan bahwa: Penurunan tegangan pada jaringan sangat kecil, yaitu di bawah **2%**, sehingga sistem bekerja dengan efisiensi tinggi.
- Tidak ditemukan adanya kelebihan arus (overload) pada penyulang maupun pemutus tenaga (circuit breaker).
- Nilai arus beban masih berada di bawah kapasitas nominal peralatan proteksi dan kabel distribusi, sehingga sistem dinyatakan **aman dan andal**.
- Nilai faktor daya rata-rata sistem sebesar **0,85 lagging**, yang menunjukkan karakteristik **beban induktif** normal pada sistem distribusi industri.

Berdasarkan hasil simulasi ini dapat disimpulkan bahwa sistem distribusi 20 kV dengan 11 bus beroperasi dalam kondisi stabil, efisien, dan sesuai dengan standar tegangan operasi. Hasil analisis aliran daya ini menjadi dasar utama untuk tahapan berikutnya, yaitu simulasi gangguan hubung singkat (Short Circuit Analysis) dan penentuan koordinasi relay OCR (Over Current Relay) untuk menjamin keandalan sistem proteksi terhadap gangguan listrik.

D. Hasil Simulasi Gangguan Hubung Singkat (Short-Circuit Analysis)



Gambar 3.3 Short-Circuit Analysis

Simulasi gangguan hubung singkat (short circuit) dilakukan pada setiap bus menggunakan perangkat lunak ETAP untuk memperoleh nilai arus gangguan tiga fasa (**3-phase fault current**) di berbagai titik jaringan distribusi 20 kV. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui besarnya arus yang muncul ketika terjadi gangguan dan bagaimana distribusi arus tersebut menyebar sepanjang penyulang.

Nilai arus gangguan diperoleh secara langsung dari hasil tampilan simulasi ETAP (angka berwarna merah pada gambar hasil perhitungan). Setiap bus dianalisis untuk menentukan besarnya arus gangguan maksimum yang dapat terjadi pada kondisi tiga fasa simetris. Secara umum, hasil utama simulasi gangguan hubung singkat menunjukkan nilai arus sebagai berikut:

- **Bus di sisi sekunder transformator (dekat sumber)** menunjukkan arus gangguan terbesar, yaitu sekitar **6,664 kA** pada cabang kanan dan **5,971 kA** pada cabang tengah.
- **pada bagian tengah penyulang (mid-feeder)** menghasilkan arus gangguan sekitar **3,99 kA**.
- **Bus di ujung penyulang kanan (dekat beban Lump3)** memiliki arus gangguan sekitar **3,705 kA**.
- **Bus di ujung penyulang tengah (dekat beban Lump2)** memiliki arus gangguan sekitar **2,865 kA**.
- **Bus di ujung penyulang kiri (dekat beban Lump1)** memiliki arus gangguan sekitar **2,873 kA**.

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dijelaskan beberapa hal penting sebagai berikut: Arus gangguan terbesar terjadi di dekat sumber atau transformator, dengan nilai mencapai 6,66 kA. Hal ini sesuai dengan teori sistem tenaga listrik bahwa semakin dekat lokasi gangguan terhadap sumber (impedansi sistem semakin kecil), maka arus gangguan yang timbul akan semakin besar. Arus gangguan menurun secara bertahap menuju ujung penyulang, di mana nilai arus di ujung jaringan (end-of-line) berada pada kisaran 2,8–3,7 kA. Penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya total impedansi saluran dan panjang kabel antara sumber dan titik gangguan. Terdapat perbedaan nilai arus antar penyulang, di mana penyulang kanan memiliki arus gangguan tertinggi, diikuti oleh penyulang tengah dan penyulang kiri. Perbedaan ini terjadi karena variasi panjang saluran, impedansi kabel, serta besar daya beban pada tiap penyulang.

Dari hasil simulasi tersebut dapat disimpulkan bahwa sistem distribusi 20 kV bekerja sesuai karakteristik teori kelistrikan, di mana besarnya arus gangguan sangat dipengaruhi oleh jarak gangguan terhadap sumber, impedansi jaringan, dan kapasitas daya tiap penyulang. Hasil analisis ini menjadi dasar penting dalam perhitungan setting Over Current Relay (OCR), khususnya dalam menentukan nilai arus pickup (I_{pickup}) dan Time Multiplier Setting (TMS) agar sistem proteksi dapat bekerja secara selektif dan terkoordinasi saat gangguan terjadi.

E. Perhitungan Arus Pickup Relay OCR

Penentuan arus *pickup* dilakukan untuk setiap relay arus lebih (OCR) yang terpasang pada pemutus tenaga (CB) di sistem distribusi 20 kV. Setiap relay memiliki rasio trafo arus (CT) yang berbeda sesuai dengan kapasitas arus pada jalur atau penyulang yang dilindungi.

Perhitungan arus *pickup* sekunder menggunakan persamaan berikut:

Keterangan:

- arus *pickup* pada sisi sekunder relay (A)
- arus gangguan maksimum pada sisi primer (A), dari hasil simulasi ETAP
- rasio trafo arus (CT), yaitu perbandingan antara arus primer terhadap arus sekunder
- Faktor 1,2 digunakan sebagai margin keamanan terhadap beban maksimum

Adapun hasil perhitungan arus *pickup* sekunder pada masing-masing relay adalah sebagai berikut:

1. **Relay-1 (CB utama)**
 - Lokasi: sisi sekunder trafo (sumber 20 kV)
 - Rasio CT: **5 : 6000**
 - Arus gangguan maksimum: **6.664 A**
 - Arus *pickup* sekunder: **6,66 A**
2. **Relay-2 (Feeder 1)**
 - Lokasi: awal penyulang 1
 - Rasio CT: **5 : 1800**
 - Arus gangguan maksimum: **2.873 A**

- Arus *pickup* sekunder: **9,58 A**
- 3. **Relay-3 (Feeder 2)**
 - Lokasi: awal penyulang 2
 - Rasio CT: **5 : 1700**
 - Arus gangguan maksimum: **2.865 A**
 - Arus *pickup* sekunder: **10,1 A**
- 4. **Relay-4 (Feeder 3)**
 - Lokasi: awal penyulang 3
 - Rasio CT: **5 : 2500**
 - Arus gangguan maksimum: **3.705 A**
 - Arus *pickup* sekunder: **8,89 A**
- 5. **Relay-5 (Beban 1)**
 - Lokasi: ujung penyulang 1 (Lump1)
 - Rasio CT: **5 : 1800**
 - Arus gangguan maksimum: **2.873 A**
 - Arus *pickup* sekunder: **9,58 A**
- 6. **Relay-6 (Beban 2)**
 - Lokasi: ujung penyulang 2 (Lump2)
 - Rasio CT: **5 : 1700**
 - Arus gangguan maksimum: **2.865 A**
 - Arus *pickup* sekunder: **10,1 A**
- 7. **Relay-7 (Beban 3)**
 - Lokasi: ujung penyulang 3 (Lump3)
 - Rasio CT: **5 : 2500**
 - Arus gangguan maksimum: **3.705 A**
 - Arus *pickup* sekunder: **8,89 A**

Dari hasil perhitungan di atas dapat dilihat bahwa nilai arus *pickup* sekunder setiap relay berbeda-beda, tergantung pada besarnya arus gangguan dan rasio CT yang digunakan. Relay utama (Relay-1) memiliki nilai *pickup* terkecil yaitu **6,66 A**, karena rasio CT-nya besar (5:6000), sehingga relay lebih sensitif terhadap perubahan arus. Sedangkan relay pada penyulang memiliki nilai *pickup* sedikit lebih tinggi (8,89–10,1 A), menyesuaikan dengan arus gangguan yang lebih kecil dan rasio CT yang lebih rendah.

Nilai arus *pickup* ini menjadi dasar dalam perhitungan **Plug Setting Multiplier (PSM)** dan **Time Multiplier Setting (TMS)** pada tahap koordinasi berikutnya. Dengan pengaturan ini, diharapkan sistem proteksi dapat bekerja secara selektif, cepat, dan andal sesuai posisi gangguan di sistem.

F. Perhitungan dan Koordinasi Relay OCR (PSM dan TMS)

Setelah diperoleh nilai arus *pickup* (I_{pickup}) untuk setiap relay, langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan **Plug Setting Multiplier (PSM)** dan **Time Multiplier Setting (TMS)** agar didapat koordinasi waktu kerja relay yang selektif dan terurut.

Perhitungan ini menggunakan **kurva karakteristik Standard Inverse** berdasarkan standar **IEC 60255**

1) Perhitungan Plug Setting Multiplier (PSM)

Nilai PSM menunjukkan seberapa besar arus gangguan dibandingkan dengan arus *pickup* pada relay. Perhitungannya dinyatakan dengan rumus:

$$PSM = \frac{I_{fault}}{I_{pickup}}$$

Keterangan:

- = arus gangguan maksimum (A) hasil simulasi ETAP
- = arus *pickup* sekunder pada relay (A)

PSM yang lebih besar dari 1 menandakan relay akan bekerja pada kondisi arus lebih. Semakin besar nilai PSM, semakin cepat waktu kerja relay.

2) Perhitungan Waktu Operasi Relay

Setelah nilai PSM diketahui, waktu operasi relay dapat dihitung dengan rumus:

$$t = TMS \times \frac{0.14}{(PSM^{0.02} - 1)}$$

Rumus ini menunjukkan hubungan antara arus gangguan dan waktu operasi relay berdasarkan kurva *Standard Inverse*. Nilai *Time Multiplier Setting* (TMS) diatur agar setiap relay memiliki waktu operasi yang sesuai urutan koordinasi, yaitu:

Relay di sisi beban bekerja lebih cepat daripada **relay di sisi penyulang**, dan **relay utama (incomer)** bekerja paling lambat. Berdasarkan hasil analisis koordinasi dengan data dari ETAP, diperoleh hasil perhitungan sebagai berikut:

1. **Relay CB5 (Beban Lump1)**
 - I load = 43,3 A
 - I pickup = 51,96 A
 - Ifault = 2.873 A
 - PSM = 55,29
 - Waktu kerja yang diinginkan: 0,20 s
 - TMS = 0,119
2. **Relay CB8 (Beban Lump2)**
 - Iload = 40,1 A
 - Ipickup = 48,12 A
 - Ifault = 2.865 A
 - PSM = 59,54
 - Waktu kerja: 0,20 s
 - TMS = 0,122
3. **Relay CB6 (Beban Lump3)**
 - Iload = 62,3 A
 - Ipickup = 74,76 A
 - Ifault = 3.705 A
 - PSM = 49,56
 - Waktu kerja: 0,20 s
 - TMS = 0,116
4. **Relay CB2 (Feeder 1)**
 - Iload = 43,3 A
 - Ipickup = 51,96 A
 - Ifault = 2.873 A
 - PSM = 55,29
 - Waktu kerja: 0,45 s
 - TMS = 0,269
5. **Relay CB3 (Feeder 2)**
 - Iload = 40,1 A
 - Ipickup = 48,12 A
 - Ifault = 2.865 A
 - PSM = 59,54
 - Waktu kerja: 0,45 s
 - TMS = 0,274
6. **Relay CB4 (Feeder 3)**
 - Iload = 62,3 A
 - Ipickup = 74,76 A
 - Ifault = 3.705 A

- PSM = 49,56
- Waktu kerja: 0,45 s
- TMS = 0,261

7. Relay CB1 (Utama / Main Incomer)

- Iload = 145,7 A
- Ipickup = 174,84 A
- Ifault = 6.664 A
- PSM = 38,11
- Waktu kerja: 0,85 s
- TMS = 0,459

Dari hasil perhitungan di atas diperoleh bahwa semua nilai PSM jauh lebih besar dari 10, yang berarti seluruh relay akan **aktif bekerja** pada saat terjadi arus gangguan hubung singkat. Nilai **TMS** yang diperoleh berada di rentang **0,11–0,46**, menunjukkan adanya perbedaan waktu kerja yang cukup untuk memastikan sistem proteksi bekerja secara selektif. Relay pada sisi beban (CB5, CB8, CB6) memiliki waktu kerja paling cepat, yaitu sekitar **0,2 detik**. Relay pada penyulang (CB2, CB3, CB4) memiliki waktu tunda sekitar **0,45 detik**, dan relay utama (CB1) bekerja paling lambat pada **0,85 detik**.

Urutan kerja yang diperoleh adalah:

CB5, CB8, CB6 (beban) → CB2, CB3, CB4 (feeder) → CB1 (utama)

Dengan urutan ini, jika terjadi gangguan di salah satu ujung penyulang, relay yang paling dekat (misalnya CB5 di Lump1) akan bekerja lebih dulu untuk memutus arus gangguan, sedangkan relay di sisi hulu tetap siaga sebagai cadangan (backup).

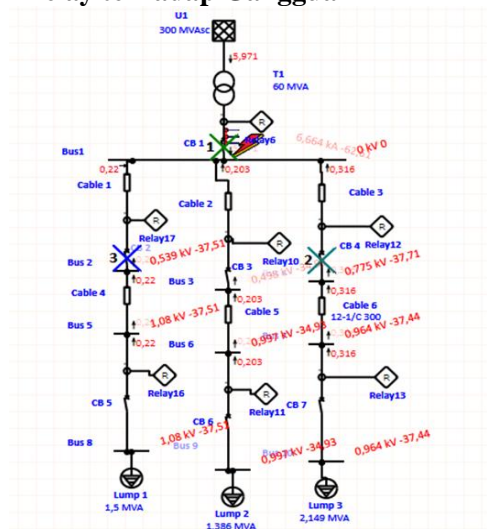
Hasil koordinasi dari simulasi **ETAP TCC (Time Current Characteristic)** menunjukkan tidak adanya tumpang tindih antar kurva operasi relay, sehingga sistem proteksi memenuhi kriteria:

- **Selektivitas:** setiap relay bekerja sesuai area gangguannya.
- **Keandalan:** backup bekerja bila proteksi utama gagal.
- **Kecepatan:** waktu kerja sesuai standar IEC dan IEEE 242.

Berdasarkan hasil koordinasi, diperoleh bahwa:

1. Relay beban (CB5, CB8, CB6) bekerja dengan waktu sekitar **0,2 s**.
2. Relay penyulang (CB2, CB3, CB4) bekerja dengan waktu sekitar **0,45 s**, dengan *grading time* ±0,25 detik dari relay beban.
3. Relay utama (CB1) bekerja paling lambat yaitu **0,85 s**, berfungsi sebagai **backup protection**.
4. Sistem proteksi hasil simulasi telah memenuhi prinsip **selektivitas dan keandalan**, sesuai standar **IEC 60255** dan **IEEE 242**.

G. Analisis Respon Relay terhadap Gangguan



Gambar 3.4 Respon Relay Terhadap Gangguan

Gambar di atas menunjukkan hasil simulasi kerja **relay arus lebih (OCR)** terhadap kondisi **gangguan hubung singkat tiga fasa (3Φ short circuit)** yang terjadi pada sistem distribusi 20 kV. Simulasi dilakukan untuk mengamati **koordinasi kerja antar relay** saat terjadi gangguan, serta memastikan bahwa sistem proteksi bekerja secara selektif sesuai dengan hasil perhitungan dan setting yang telah dilakukan sebelumnya.

- Tegangan sistem: 20 kV
- Daya hubung singkat sumber: 300 MVA
- Kapasitas transformator: 60 MVA
- Jenis gangguan: **3 fasa simetris (3Φ fault)**
- Lokasi gangguan: salah satu bus pada penyulang tengah (sekitar Bus5–Bus6)
- Kurva karakteristik relay: **Standard Inverse (IEC 60255)**
- Setting relay sesuai hasil perhitungan sebelumnya (I_{pickup} dan TMS berbeda tiap penyulang)
- **Simbol “X” berwarna biru pada Relay17, Relay10, Relay11, dan Relay12** menunjukkan **relay yang aktif bekerja (trip)** akibat mendeteksi arus gangguan melebihi nilai pickup. Relay yang berada paling dekat dengan titik gangguan akan bekerja terlebih dahulu.
- **Nilai arus dan tegangan berwarna merah** menunjukkan **arus gangguan dan penurunan tegangan** yang terjadi di masing-masing bus.

Contohnya:

- Pada Bus5, arus gangguan mencapai sekitar **5,97 kA**
- Tegangan turun drastis hingga **0,539 kV ($\approx 2,7\%$ dari nominal)**
- Hal ini menunjukkan bahwa titik tersebut merupakan lokasi utama gangguan.
- **Bus lain yang tidak terganggu** (seperti penyulang kiri dan kanan) masih menunjukkan tegangan sekitar **0,9–1,0 kV** dengan arus gangguan lebih kecil, menandakan pengaruh gangguan tidak menyebar luas karena koordinasi proteksi yang baik.
- **Relay utama (CB1)** di sisi sekunder transformator tidak langsung bekerja, melainkan menunggu waktu koordinasi dari relay di bawahnya (delay sekitar 0,4–0,6 detik). Ini menunjukkan bahwa fungsi *backup protection* relay utama berjalan dengan benar

Berdasarkan hasil simulasi, diperoleh beberapa temuan penting:

1. **Relay yang paling dekat dengan titik gangguan** (pada penyulang tengah) bekerja paling cepat, yaitu sekitar **0,2 detik**, sesuai dengan nilai TMS = 0,12 yang telah dihitung.
2. **Relay pada sisi feeder (Relay10 atau CB3)** bekerja dengan waktu tunda sekitar **0,45 detik**, sehingga memberikan waktu cukup bagi relay downstream untuk terlebih dahulu mengisolasi gangguan.
3. **Relay utama (Relay1 atau CB1)** baru bekerja apabila gangguan tidak teratasi oleh relay di bawahnya, dengan waktu operasi sekitar **0,85 detik**, sesuai dengan fungsinya sebagai *backup protection*.
4. Tegangan pada bus-bus yang tidak terganggu tetap stabil (sekitar 0,96–0,98 p.u), membuktikan bahwa koordinasi relay telah mencegah pemadaman menyeluruh.

Hasil simulasi ini membuktikan bahwa **pengaturan relay OCR telah berfungsi secara selektif dan terkoordinasi dengan baik**. Relay yang terdekat dengan titik gangguan berhasil memutus arus lebih dengan cepat tanpa menyebabkan relay di sisi lain ikut trip. Dengan demikian, sistem proteksi yang dirancang menggunakan ETAP telah memenuhi kriteria:

- **Kecepatan (speed)** → waktu kerja cepat pada titik gangguan.
- **Selektivitas (selectivity)** → hanya relay terdekat yang bekerja.
- **Keandalan (reliability)** → relay utama tetap berfungsi sebagai *backup*.

Hasil ini sejalan dengan teori koordinasi proteksi berdasarkan standar **IEEE 242** dan **IEC 60255**, serta menunjukkan bahwa metode simulasi menggunakan ETAP dapat diterapkan secara efektif untuk analisis sistem proteksi distribusi 20 kV.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis koordinasi relay proteksi gangguan hubung singkat menggunakan perangkat lunak ETAP pada sistem distribusi 20 kV dengan 11 bus, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Sistem distribusi tenaga listrik yang dimodelkan memiliki konfigurasi radial 20 kV dengan 11 bus dan 11 beban utama, serta total daya sebesar $\pm 8,55$ MVA dengan faktor daya rata-rata 0,85 lagging. Hasil simulasi aliran daya menunjukkan bahwa seluruh tegangan bus berada dalam rentang 98,3%–99,5% dari tegangan nominal, sehingga sistem berada dalam kondisi stabil dan efisien tanpa mengalami drop tegangan yang signifikan.
2. Hasil analisis gangguan hubung singkat tiga fasa (3Φ fault) menunjukkan bahwa nilai arus gangguan tertinggi terjadi pada sisi sekunder transformator dengan besar arus sekitar 6,664 kA, sedangkan arus gangguan terendah terjadi di ujung penyulang dengan nilai sekitar 2,865–3,705 kA. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya arus gangguan menurun seiring bertambahnya jarak dari sumber akibat peningkatan impedansi saluran, sesuai dengan teori sistem tenaga listrik.
3. Perhitungan dan koordinasi relay OCR (Over Current Relay) dilakukan menggunakan kurva Standard Inverse (IEC 60255). Hasil perhitungan menunjukkan nilai Plug Setting Multiplier (PSM) untuk seluruh relay berada di atas 10, menandakan bahwa semua relay akan bekerja pada kondisi gangguan. Nilai Time Multiplier Setting (TMS) berkisar antara 0,11–0,46, dengan waktu kerja relay beban sekitar 0,2 detik, relay penyulang 0,45 detik, dan relay utama 0,85 detik.
4. Urutan kerja relay berdasarkan hasil koordinasi adalah:
 - Relay beban (CB5, CB6, CB8) bekerja lebih cepat untuk memutus gangguan di ujung penyulang.
 - Relay penyulang (CB2, CB3, CB4) bekerja dengan sedikit waktu tunda sebagai proteksi sekunder.
 - Relay utama (CB1) bekerja paling lambat sebagai backup protection untuk seluruh sistem.Urutan ini menunjukkan bahwa sistem proteksi telah bekerja selektif dan terkoordinasi dengan baik.
5. Hasil simulasi koordinasi di ETAP memperlihatkan bahwa kurva karakteristik waktu–arus (TCC) antar relay tidak saling tumpang tindih, sehingga sistem memenuhi kriteria selektivitas, kecepatan, dan keandalan sesuai standar IEEE 242 dan IEC 60255.
6. Secara keseluruhan, sistem proteksi pada jaringan distribusi 20 kV yang dianalisis mampu mengisolasi gangguan secara cepat dan tepat, meminimalkan area pemadaman, serta melindungi peralatan listrik dari dampak arus lebih dan gangguan hubung singkat. Metode simulasi dan analisis menggunakan ETAP terbukti efektif untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan koordinasi relay OCR pada sistem distribusi tenaga listrik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] [1] A. P. Andika, “Analisis Koordinasi Relay Arus Lebih (Over Current Relay) pada Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan ETAP,” *Jurnal Teknik Elektro dan Energi*, vol. 8, no. 2, pp. 45–53, 2023.
- [2] R. S. Nugraha, “Analisis Sistem Proteksi pada Jaringan Distribusi Tenaga Listrik 20 kV terhadap Gangguan Hubung Singkat,” *Jurnal Energi dan Kelistrikan*, vol. 7, no. 1, pp. 12–20, 2022.