

# TUGAS AKHIR

## ANALISIS KINERJA SISTEM PROTEKSI RELE DIFFERENSIAL PADA TRANSFORMATOR DAYA MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK DI PT. PLN (PERSERO) UIP3B SUMATERA

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh Gelar  
Sarjana Teknik (S.T) Pada Program Studi Teknik Elektro,  
Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

**Disusun Oleh:**

**MUHAMMAD RIAN FAUZAN**  
**2107220046**



# UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
MEDAN  
2025**

## HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Muhammad Rian Fauzan  
NPM : 2107220046  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisis Kinerja Sistem Proteksi Rele Differensial Pada Transformator Daya Menggunakan Matlab Simulink Di PT. PLN (PERSERO) UIP3B SUMATERA  
Bidang ilmu : Sistem Tenaga

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, September 2025

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I / Penguji

Dr. Rohana, S.T., M.T

Dosen Pembanding I / Penguji

Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

Dosen Pembanding II / Peguji

Faisal Irsan Pasaribu, S.T., S.Pd., M.T

Program Studi Teknik Elektro  
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA  
URUSAN ELEKTRO  
Dr. Elvy Sahnur Nasution, S.T., M.Pd

## SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Muhammad Rian Fauzan  
Tempat /Tanggal Lahir : Medan/20 Mei 2003  
NPM : 2107220046  
Fakultas : Teknik  
Program Studi : Teknik Elektro

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

**“ANALISIS KINERJA SISTEM PROTEKSI RELE DIFFERENSIAL PADA TRANSFORMATOR DAYA MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK DI PT. PLN (PERSERO) UIP3B SUMATERA”**,

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 30 September 2025

Saya yang menyatakan,

  
Muhammad Rian Fauzan

## ABSTRAK

Transformator daya merupakan salah satu komponen vital dalam sistem tenaga listrik yang memerlukan sistem proteksi handal untuk mencegah kerusakan akibat gangguan. Salah satu metode proteksi yang umum digunakan adalah proteksi rele diferensial, yang bekerja dengan membandingkan arus pada sisi primer dan sekunder transformator. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya berkapasitas 60 MVA di Gardu Induk GIS 150 kV Titi Kuning menggunakan MATLAB Simulink, menganalisis kinerjanya dalam mendeteksi gangguan eksternal, serta menentukan parameter setting optimal untuk meningkatkan keandalan sistem. Data teknis transformator, current transformer (CT), dan rele diferensial diperoleh dari pengukuran lapangan dan dokumentasi PLN. Model simulasi dibangun dengan memodelkan sumber tiga fasa, transformator, CT pada kedua sisi, subsistem logika rele diferensial, beban, serta breaker untuk skenario gangguan eksternal. Pengujian dilakukan pada kondisi normal dan gangguan eksternal, serta dengan variasi nilai pickup setting. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada setting pickup  $1,2 \times I_n$  dan slope 30%, sistem proteksi diferensial bekerja stabil, tidak trip pada kondisi normal maupun gangguan eksternal. Variasi pickup menunjukkan bahwa setting terlalu rendah ( $1,0 \times I_n$ ) meningkatkan risiko *false trip*, sedangkan setting terlalu tinggi ( $1,5 \times I_n$ ) menurunkan sensitivitas terhadap gangguan internal. Setting optimal direkomendasikan pada  $1,2 \times I_n$ , yang memberikan keseimbangan antara sensitivitas dan ketahanan terhadap gangguan eksternal. Penelitian ini membuktikan bahwa pemilihan parameter setting yang tepat sangat mempengaruhi keandalan sistem proteksi diferensial transformator daya.

Kata kunci : Proteksi Diferensial, Transformator Daya, MATLAB Simulink, Pickup Setting.

## **ABSTRACT**

*Power transformers are vital components in electrical power systems that require reliable protection systems to prevent damage caused by faults. One commonly used protection method is differential relay protection, which operates by comparing the currents on the primary and secondary sides of the transformer. This study aims to simulate the differential relay protection system for a 60 MVA power transformer at the GIS 150 kV Titi Kuning Substation using MATLAB Simulink, analyze its performance in detecting external faults, and determine the optimal setting parameters to improve system reliability. Technical data of the transformer, current transformers (CT), and differential relay were obtained from field measurements and PLN documentation. The simulation model was built by modeling a three-phase power source, transformer, CTs on both sides, a differential relay logic subsystem, load, and a breaker for external fault scenarios. Tests were conducted under normal conditions, external fault conditions, and with variations in pickup settings. The simulation results show that with a pickup setting of  $1.2 \times I_n$  and a 30% slope, the differential protection system operated stably, without tripping under normal or external fault conditions. Pickup variation tests revealed that too low a setting ( $1.0 \times I_n$ ) increases the risk of false tripping, while too high a setting ( $1.5 \times I_n$ ) reduces sensitivity to internal faults. The optimal setting is recommended at  $1.2 \times I_n$ , which provides a balance between sensitivity and stability against external faults. This study demonstrates that selecting appropriate setting parameters significantly affects the reliability of a transformer differential protection system.*

*Keywords : Differential Protection, Power Transformer, MATLAB Simulink, Pickup Setting.*

## KATA PENGHANTAR



Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala Puji dan Syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis menyelesaikan laporan tugas akhir yang berjudul “ANALISIS KINERJA SISTEM PROTEKSI RELE DIFFERENSIAL PADA TRANSFORMATOR DAYA MENGGUNAKAN MATLAB SIMULINK DI PT. PLN (PERSERO) UIP3B SUMATERA” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarja Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU).

Laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik, tentunya tidak terlepas dari dukungan berbagai pihak. Untuk itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Yang teristimewa kepada ayahanda RUDI RIANTO dan ibunda tercinta MAIMUNAH BR SINAGA yang telah memberikan dukungan bagi penulis dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
2. Bapak Prof. Dr. H. Agussani, M.AP, selaku Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
3. Kepada keluarga saya, terutama kakak saya Syahfitri Wulandari dan Elza Anggraini, yang selalu mendoakan, memberikan perhatian, serta kasih sayang yang menjadi sumber kekuatan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Munawar Alfansury Siregar, S.T., M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
5. Ibu Dr. Elvy Sahnur, S.T., M.Pd selaku Kepala Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Bapak Benny Oktorialdi, S.T., M.T, selaku Sekretaris Prodi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
7. Bapak Affandi, S.T., M.T. selaku Wakil Dekan III Bidang Kemahasiswaan Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

8. Ibu Dr. Rohana, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing yang telah membantu menyelesaikan serta memberikan ide-ide dan masukan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
9. Terima kasih yang istimewa kepada NUR'AINUN, yang tak henti memberikan doa, motivasi, dan kasih sayang. Dalam setiap lelah, ia hadir sebagai penguat; dalam setiap keraguan, ia hadir memberi keyakinan. Kehadiran dan cintanya menjadi bagian berharga dalam perjalanan penulis menyelesaikan tugas akhir ini.
10. Ibu Dr. Elvy Sahnur, S.T., M.Pd, selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan ide-ide dan masukan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
11. Bapak Faisal Irsan Pasaribu, S.T., M.T, selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan ide-ide dan masukan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
12. Terima kasih kepada teman dekat saya, Firji Wira Agungatmaja, Stephen, dan Fadil, atas dukungan, kebersamaan, dan semangat yang diberikan hingga penyelesaian tugas akhir ini.
13. Teruntuk Sahabat Sahabat saya Aldi Syahputra, Abdur Rahman Hidayat Tarigan, Da'i Rinaldy, Fitria dan Zunaidi. Terimakasih atas dukungan, bantuan dan motivasi dalam penyelesaian skripsi dan kebersamaannya selama di kuliah ini.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan maupun dalam susunan kalimat sehingga penulis menerima kritikan dan saran yang sifatnya membangun demi kesempurnaan laporan Tugas Akhir ini. Penulis mengharapkan semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan para pembaca. Akhirnya kepada Allah SWT penulis serahkan segala ketercapaian dan keberhasilan yang sepenuhnya.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh

Medan,      Agustus 2025  
Penulis

Muhammad Rian Fauzan

## DAFTAR ISI

|   |             |
|---|-------------|
| <b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>                        | <b>i</b>    |
| <b>SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....</b>     | <b>ii</b>   |
| <b>ABSTRAK .....</b>                                  | <b>iii</b>  |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                 | <b>ii</b>   |
| <b>KATA PENGHANTAR.....</b>                           | <b>v</b>    |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                                | <b>vi</b>   |
| <b>DAFTAR GAMBAR.....</b>                             | <b>viii</b> |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                             | <b>viii</b> |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>                          | <b>ix</b>   |
| <b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>                        | <b>1</b>    |
| 1.1 Latar Belakang .....                              | 1           |
| 1.2 Identifikasi Masalah .....                        | 2           |
| 1.3 Rumusan Masalah .....                             | 2           |
| 1.4 Ruang Lingkup Penelitian .....                    | 3           |
| 1.5 Tujuan Penelitian .....                           | 3           |
| 1.6 Manfaat Penelitian .....                          | 3           |
| 1.7 Sistematika Penulisan.....                        | 4           |
| <b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....</b>                    | <b>6</b>    |
| 2.1 Tinjauan Pustaka Relevan .....                    | 6           |
| 2.2 Sistem Proteksi.....                              | 8           |
| 2.2.1 Konsep Dasar Sistem Proteksi .....              | 10          |
| 2.3 Transformator.....                                | 12          |
| 2.3.1 Parameter Pada Transformator.....               | 13          |
| 2.3.2 Struktur dan Komponen Utama Transformator ..... | 14          |
| 2.3.3 Sistem Proteksi Transformator.....              | 17          |
| 2.4 Rele Differensial .....                           | 17          |
| 2.4.1 Prinsip Kerja Rele Diferensial .....            | 18          |
| 2.4.2 Jenis-jenis Rele Differensial .....             | 20          |
| 2.5 Kinerja Sistem Proteksi Rele Diferensial.....     | 22          |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.5.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kinerja .....          | 23        |
| 2.5.2 Evaluasi Operasional.....                              | 24        |
| 2.6 Keandalan Sistem Proteksi.....                           | 26        |
| 2.6.1 Parameter Keandalan .....                              | 26        |
| 2.6.2 Pendekatan dalam Pengukuran Keandalan .....            | 27        |
| 2.7 Matlab Simulink.....                                     | 28        |
| 2.7.1 Jenis Gangguan Yang Disimulasikan .....                | 30        |
| 2.7.2 Komponen Simulasi Pada Matlab Simulink .....           | 30        |
| 2.7.3 Rekomendasi Parameter Optimal.....                     | 31        |
| <br>   |           |
| <b>BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....</b>                      | <b>34</b> |
| 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian .....                        | 34        |
| 3.2 Data Penelitian .....                                    | 34        |
| 3.3 Diagram Blok Penelitian .....                            | 36        |
| 3.3.1 Penjelasan Dari Diagram Blok.....                      | 36        |
| 3.4 Prosedur Penelitian.....                                 | 38        |
| 3.5 Diagram Alir Penelitian .....                            | 43        |
| 3.5.1 Penjelasan Dari Diagram Alir .....                     | 44        |
| <br>   |           |
| <b>BAB 4 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN .....</b>           | <b>47</b> |
| 4.1 Analisis data gangguan sistem .....                      | 47        |
| 4.1.1 Sumber data gangguan .....                             | 47        |
| 4.1.2 Jenis dan karakteristik gangguan .....                 | 49        |
| 4.1.3 Analisis Dampak Gangguan terhadap Sistem Proteksi..... | 50        |
| 4.2 Spesifikasi sistem dan peralatan.....                    | 53        |
| 4.2.1 Transformator Daya .....                               | 54        |
| 4.2.2 Current Transformer (CT).....                          | 54        |
| 4.2.3 Rele Proteksi Diferensial.....                         | 55        |
| 4.2.4 Relevansi spesifikasi terhadap simulasi MATLAB .....   | 55        |

|  |              |
|--|--------------|
| 4.3 Pembangunan model simulasi sistem proteksi rele diferensial.....   | 56           |
| 4.3.1 Tujuan dan ruang lingkup model .....                             | 57           |
| 4.3.2 Pengumpulan dan penentuan parameter dasar .....                  | 57           |
| 4.3.3 Struktur model simulasi .....                                    | 58           |
| 4.3.4 Subsystem logika rele diferensial .....                          | 60           |
| 4.3.5 Langkah-langkah setting rele diferensial di MATLAB Simulink..... | 62           |
| 4.3.6 Hasil Simulasi Awal.....   | 63           |
| 4.4 Pengujian Variasi Pickup Setting.....                              | 66           |
| <b>BAB 5 PENUTUP.....</b>  | <b>72</b>    |
| 5.1 Kesimpulan .....   | 72           |
| 5.2 Saran .....  | 73           |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>  | <b>.....</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1 Elektromagnetik pada trafo .....  | 13 |
| Gambar 2.2 Kumputan transformator .....  | 15 |
| Gambar 2.3 Inti besi transformator .....   | 15 |
| Gambar 2.4 <i>Bushing</i> .....  | 16 |
| Gambar 2.5 Rele diferensial kondisi gangguan diluar .....                                      | 18 |
| Gambar 2.6 Rele diferensial kondisi gangguan didalam .....                                     | 19 |
| Gambar 2.7 Rele arus diferensial .....   | 21 |
| Gambar 2.8 Rele persentase diferensial .....   | 22 |
| Gambar 3.1 Diagram blok .....  | 36 |
| Gambar 3.2 Diagram alir penelitian .....   | 43 |
| Gambar 4.1 Rangkaian simulasi sistem proteksi rele diferensial di MATLAB<br>Simulink .....     | 58 |
| Gambar 4.2 Subsystem Logika Rele Diferensial .....   | 60 |
| Gambar 4.3 Grafik $I_{diff}$ vs waktu pada kondisi normal dan gangguan eksternal ..            | 65 |
| Gambar 4.4 Grafik $I_{restraint}$ vs waktu pada kondisi normal dan gangguan<br>eksternal ..... | 66 |

## DAFTAR TABEL

|  |    |
|--|----|
| Table 3.1 Spesifikasi Teknis Transformator 60 MVA.....   | 34 |
| Table 3.2 laporan kondisi trip, lepas, dan masuk penyulang 20 kv / bus tie 20 kv<br>di gardu gis listrik upt medan ..... | 35 |
| Table 3.3 setting rele over current dan ground fault .....   | 35 |
| Tabel 4.1 Rekapitulasi gangguan penyulang/bustie 20 kv – gardu induk gis titi<br>kuning .....                            | 48 |
| Tabel 4.2 Parameter model simulasi (digunakan pada simulink) .....   | 57 |
| Tabel 4.3 Rekapitulasi hasil simulasi.....   | 63 |
| Tabel 4.4 hasil simulasi dengan tiga variasi pickup setting .....  | 67 |

## DAFTAR LAMPIRAN

- |            |   |
|------------|---|
| Lampiran 1 | Surat permohonan pengambilan data ke PT. PLN (Persero) UIP3B SUMATERA |
| Lampiran 2 | Surat balasan pengambilan data dari PT.PLN (Persero) UIP3B SUMATERA   |
| Lampiran 3 | Diagram satu garis gardu induk 150kV GIS LISTRIK                      |
| Lampiran 4 | Data transformator  |

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Proteksi merupakan suatu bentuk perlindungan terhadap peralatan listrik yang berguna untuk menghindari kerusakan peralatan dan juga agar stabilitas penyaluran tenaga listrik tetap terjaga. Tujuan sistem proteksi adalah untuk mengetahui gangguan-gangguan yang terjadi dan memisahkan bagian yang terkena gangguan dari bagian lain yang tidak terkena gangguan sekaligus mengamankan bagian tidak terkena gangguan dari kerusakan yang lebih besar akibat adanya gangguan tersebut. Dengan adanya sistem proteksi yang andal, kontinuitas dan keamanan operasi sistem tenaga listrik dapat terjamin. Dalam sistem tenaga listrik, transformator daya menjadi salah satu komponen yang memiliki peran utama yang digunakan untuk mentransfer dan mengubah tegangan listrik antar level tegangan, sesuai kebutuhan sistem transmisi atau distribusi. Karena sifatnya yang penting dan lokasinya dalam sistem, transformator daya sering kali menjadi titik yang rentan terhadap berbagai gangguan, seperti hubung singkat antar fasa atau gangguan tanah. Kerusakan pada transformator daya tidak hanya memengaruhi komponen itu sendiri tetapi juga dapat mengakibatkan gangguan pada sistem secara keseluruhan [1].

Rele diferensial adalah sistem proteksi yang dirancang khusus untuk melindungi transformator daya dari gangguan internal, seperti hubung singkat atau arus lebih. Rele ini bekerja dengan cara membandingkan arus yang masuk dan keluar pada transformator, dan jika terdeteksi adanya perbedaan arus yang signifikan, rele diferensial akan segera memutuskan aliran listrik untuk mencegah kerusakan lebih lanjut. Karena sifatnya yang cepat dalam mendeteksi gangguan, rele diferensial menjadi solusi proteksi utama yang sangat efektif untuk memastikan transformator tetap beroperasi dengan aman dan tidak mengalami kerusakan akibat gangguan internal yang tidak terlihat [2].

Matlab Simulink adalah perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi sistem dinamis secara grafis, yang sangat berguna dalam analisis dan pengembangan sistem proteksi, termasuk proteksi rele diferensial pada transformator daya. Dengan tampilan grafis yang mudah dipahami, Simulink memungkinkan pengguna untuk membangun model sistem proteksi secara visual

dan melakukan simulasi dalam berbagai kondisi gangguan. Integrasi Simulink dengan Matlab memungkinkan pemrograman algoritma dan analisis data secara langsung, memberikan kemudahan dalam menguji kinerja sistem proteksi rele diferensial. Melalui simulasi ini, kinerja proteksi dapat dianalisis dan dievaluasi secara mendalam untuk memastikan bahwa transformator daya terlindungi dengan efektif dari gangguan yang dapat merusak sistem secara keseluruhan [3].

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya 60 MVA menggunakan Matlab Simulink, menganalisis kinerjanya dalam mendeteksi gangguan internal, dan memberikan rekomendasi parameter optimal untuk meningkatkan keandalan sistem. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan wawasan teoretis, tetapi juga rekomendasi praktis yang dapat diterapkan dalam pengelolaan transformator daya untuk meningkatkan keandalan dan keamanan operasi sistem tenaga listrik.

## **1.2 Identifikasi Masalah**

Identifikasi masalah dari penelitian ini adalah:

1. Kurangnya analisis kinerja rele diferensial dalam mendeteksi jenis gangguan pada transformator daya.
2. Parameter proteksi yang diterapkan pada sistem rele diferensial belum dirancang secara optimal untuk memastikan keandalan proteksi pada kondisi operasi.
3. Keterbatasan pengujian secara konvensional menjadi alasan untuk menggunakan simulasi sebagai alternatif yang lebih efektif

## **1.3 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mensimulasikan sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya 60 MVA menggunakan Matlab Simulink?
2. Bagaimana menganalisis kinerja sistem proteksi rele diferensial dalam mendeteksi gangguan eksternal pada transformator daya?
3. Parameter apa saja yang digunakan untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya?

#### **1.4 Ruang Lingkup Penelitian**

Penelitian ini memiliki beberapa batasan sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada transformator daya berkapasitas 60 MVA yang digunakan di PT. PLN (PERSERO) UIP3B Sumatera. Transformator ini menjadi objek simulasi untuk mengkaji sistem proteksi rele differensial.
2. Simulasi sistem proteksi dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink, hal ini dikarenakan kemampuannya dalam memodelkan sistem tenaga listrik secara lengkap dan memudahkan dalam menganalisis parameter proteksi.
3. Penelitian difokuskan pada analisis gangguan eksternal transformator, seperti hubungan singkat antar lilitan.
4. Parameter untuk mensimulasikan sistem proteksi rele differensial pada transformator, dimana adalah, transformator, current transformator (CT), rele differensial, jenis gangguan yang di simulasikan, dan komponen simulasi matlab Simulink.
5. Parameter untuk menganalisis kinerja sistem proteksi rele differensial pada transformator, yaitu, rele differensial, transformator, parameter gangguan, current transformator (CT), dan hasil analisis.
6. Rekomendasi parameter optimal untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi yaitu, kinerja rele differensial, pengaturan current transformator (CT), penanganan gangguan, dan pengujian sistem.

#### **1.5 Tujuan Penelitian**

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mensimulasikan sistem proteksi rele differensial pada transformator daya 60 MVA menggunakan Matlab Simulink.
2. Menganalisis kinerja sistem proteksi rele differensial dalam mendeteksi gangguan eksternal pada transformator.
3. Memberikan rekomendasi parameter optimal untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi.

#### **1.6 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Bagi universitas  
Menjadi referensi bagi mahasiswa dan peneliti lain dalam memahami dan mengembangkan sistem proteksi transformator daya menggunakan Matlab Simulink.
2. Bagi perusahaan  
Memberikan kontribusi dalam meningkatkan keandalan sistem proteksi transformator di PT. PLN (Persero) dan industri sejenis.
3. Bagi penulis  
Mendorong penggunaan simulasi berbasis Matlab Simulink dalam mendukung analisis dan pengujian sistem proteksi.

### **1.7 Sistematika Penulisan**

Untuk mempermudah pembahasan dan pemahaman maka sistematika penulisan tugas akhir ini diuraikan secara singkat sebagai berikut:

#### **BAB 1 Pendahuluan**

Menguraikan pentingnya proteksi pada transformator daya dan penggunaan Matlab Simulink untuk analisis sistem proteksi rele differensial, dilengkapi dengan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, ruang lingkup, serta manfaat penelitian.

#### **BAB 2 Tinjauan pustaka**

Membahas teori dasar transformator daya, sistem proteksi rele diferensial, simulasi dengan Matlab Simulink, dan hasil penelitian sebelumnya yang relevan sebagai landasan teori.

#### **BAB 3 Metodologi penelitian**

Menjelaskan proses perancangan simulasi sistem proteksi rele diferensial, pengaturan parameter, dan analisis kinerja menggunakan Matlab Simulink.

#### **BAB 4 Hasil dan pembahasan**

Menyajikan hasil simulasi dan analisis kinerja sistem proteksi rele differensial pada transformator daya 60 MVA dan parameter, termasuk kemampuannya mendeteksi gangguan eksternal.

#### **BAB 5 Penutup**

Menyajikan kesimpulan dari hasil penelitian dan memberikan saran untuk pengembangan lebih lanjut.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka Relevan**

Tinjauan Pustaka Relevan adalah proses umum yang dilalui untuk mendapatkan teori yang relevan dengan masalah yang diteliti. Mencari beberapa kumpulan penelitian yang terkait kemudian diangkat untuk mendukung penelitian yang dibuat agar penelitian semakin menguat. Tinjauan pustaka meliputi pengidentifikasian secara sistematis, penemuan dan analisis dokumen yang memuat informasi yang berkaitan dengan masalah penelitian.[4]

Ada beberapa penelitian mengenai sistem proteksi rele differensial pada transformator daya yang telah dilakukan, antaranya penelitian oleh Afifah Noorma Adnanti yang menganalisis kinerja rele differensial pada transformator daya di Gardu Induk Jajar 150 kV untuk memastikan deteksi gangguan internal secara optimal. Penelitian ini menggunakan metode perhitungan matematis, seperti rasio CT, mismatch error, arus diferensial, persen slope, serta simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP. Hasilnya menunjukkan bahwa rele diferensial bekerja secara efektif dengan waktu operasi 0 ms saat terjadi gangguan internal, sementara pemutus sirkuit (CB) bekerja pada 10 ms dan 52 ms. Sebaliknya, gangguan eksternal hanya memicu rele OCR. Studi ini menekankan pentingnya pengaturan nilai rele yang akurat untuk meningkatkan keandalan proteksi transformator [5].

Sebuah penelitian menarik lainnya dilakukan oleh M. Munawir Lasiyono yang fokus pada proteksi transformator daya 150 kV di Gardu Induk Pondok Indah, menggunakan rele diferensial Micom 632 dan Protocol Communications Modbus untuk meningkatkan efektivitas proteksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaturan rele diferensial guna melindungi transformator dari kerusakan akibat gangguan. Metode yang diterapkan adalah R&D (Research and Development), yang berfokus pada pengembangan dan pengujian efektivitas produk. Hasil perhitungan menunjukkan nilai  $I_{diff} = 0,39$  dan  $I_{diff\ max} = 8,07$ , sementara setting aktual di lapangan adalah  $I_{diff} = 0,3$  dan  $I_{diff\ max} = 8$ , dengan perbedaan masing-masing sebesar 30% dan 0,87%, yang masih dalam interval yang diizinkan. Pengaturan menggunakan protocol Modbus terbukti efektif dalam

mengurangi pengkabelan, memudahkan pencarian gangguan, menekan kesalahan konfigurasi, dan mempercepat perubahan setting [6].

Ada juga penelitian lainnya yang bertemakan Proteksi transformator menggunakan rele differensial untuk memastikan perlindungan terhadap gangguan internal pada transformator dilakukan oleh Syukriyadin. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja, selektivitas, dan waktu trip rele diferensial di zona proteksi, dengan menggunakan simulasi perangkat lunak PSCAD/EMTDC versi 4.2 yang mengacu pada data dari sistem WSCC 3 Machine 9 Bus Systems. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pada gangguan internal, rele diferensial melakukan trip dalam waktu 0,15 detik, dari waktu 0,22 detik hingga 0,37 detik. Sementara pada gangguan eksternal, rele tidak melakukan trip, yang membuktikan selektivitas dan efektivitas proteksi rele diferensial dalam menjaga transformator dari kerusakan. [7].

Sayed Muhammad Farabi juga melakukan penelitian mengenai proteksi transformator daya di Gardu Induk Langsa menggunakan rele diferensial untuk melindungi transformator dari gangguan internal dan eksternal secara cepat dan selektif. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengoptimalkan kinerja rele diferensial melalui simulasi dengan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Dalam penelitian ini, rasio CT yang digunakan adalah 300:1 untuk tegangan 150 kV dan 2000:1 untuk tegangan 20 kV. Hasil analisis menunjukkan error mismatch sebesar 0,0886% pada tegangan 150 kV dan 1,125% pada tegangan 20 kV, dengan arus sekunder masing-masing 0,7689 A dan 0,8860 A. Nilai arus diferensial tercatat 0,1162 A, arus penahan 0,8279 A, dan arus setting ditetapkan sebesar 0,3 A, yang memastikan bahwa kinerja rele diferensial dapat tetap optimal dalam mendeteksi gangguan pada transformator daya [8].

Penelitian mengenai pengujian sistem proteksi rele diferensial pada transformator 150/20 kV dilakukan oleh Muhammad Agi Haidar dengan tujuan untuk menguji unjuk rele diferensial pada transformator 150/20 kV terhadap gangguan akibat hubung singkat tiga fasa, fasa ke fasa, serta fasa menuju tanah, yang dilaksanakan di Gardu Induk Jatiranggon pada transformator 3. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah pengujian sistem proteksi dengan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP, serta perhitungan berdasarkan spesifikasi

transformator, Current Transformer (CT), dan rele diferensial. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil perhitungan dan simulasi ETAP sesuai dengan kondisi aktual. Analisis perbandingan deviasi tertinggi ditemukan pada gangguan hubung singkat tiga fasa, dengan nilai deviasi sebesar 8,08%. Penelitian ini mengindikasikan bahwa pengukuran dan simulasi dapat dijadikan acuan untuk mengantisipasi gangguan hubung singkat yang mungkin terjadi, serta bahwa fungsi rele differensial berfungsi dengan baik dalam menjaga sistem kelistrikan [9].

## 2.2 Sistem Proteksi

Sistem proteksi adalah susunan perangkat proteksi secara lengkap yang terdiri dari perangkat utama dan perangkat-perangkat lain yang dibutuhkan untuk melakukan fungsi proteksi. Gangguan pada sistem distribusi dapat diakibatkan oleh faktor alam, kelalaian manusia, atau kerusakan peralatan. Gangguan pada sistem tenaga listrik terdiri dari gangguan yang bersifat temporer yang dapat hilang dari sendirinya atau dengan memutuskan sesaat bagian yang terganggu dari sumber tegangan dan gangguan yang bersifat permanen, dimana untuk membebaskan diperlukan tindakan perbaikan untuk menghilangkan penyebab gangguan tersebut. Ada beberapa aspek dasar sistem proteksi, yaitu : [10]

### 1. Kepekaan (Sensitifitas)

Sistem proteksi harus mampu mendeteksi sekecil apapun ketidaknormalan sistem dan beroperasi dibawah nilai minimum gangguan. Pada prinsipnya relai harus cukup peka terhadap gangguan di kawasan pengamanannya, termasuk kawasan pengamanan cadangan-jauhnya, meskipun dalam kondisi yang memberikan deviasi yang minimum.

### 2. Selektifitas (*Selectivity*)

Sistem proteksi harus mampu menentukan daerah kerjanya dan atau fasa yang terganggu secara tepat. Zona proteksi harus tepat dan memadai untuk memastikan bahwa hanya bagian yang terganggu yang dipisahkan dari sistem pada saat terjadi gangguan atau kondisi abnormal. Pengamanan sedemikian disebut pengamanan yang selektif. Jadi relai harus dapat membedakan apakah :

- a) Gangguan terletak di kawasan pengamanan utamanya dimana ia harus bekerja cepat.

- b) Gangguan terletak di bagian berikutnya dimana ia harus bekerja dengan waktu tunda (sebagai pengaman cadangan) atau menahan diri untuk trip.
- c) Gangguannya diluar daerah pengamanannya, atau sama sekali tidak ada gangguan, dimana ia harus tidak bekerja sama sekali.

Untuk rele-rele, yang didalam sistem terletak secara seri, dikoordinir dengan mengatur peningkatan waktu (*time grading*) atau peningkatan setting arus (*current grading*), atau gabungan dari keduanya. Untuk itulah relai di buat dengan bermacam-macam jenis dan karakteristiknya. Dengan pemilihan jenis dan karakteristik relai yang tepat, spesifikasi trafo arus yang benar, serta penentuan setting relai yang terkoordinir dengan baik, selektifitas yang baik dapat diperoleh.

### 3. Kecepatan

Untuk memperkecil kerusakan/ kerugian akibat gangguan, maka bagian yang terganggu harus dipisahkan secepat mungkin dari bagian sistem lainnya. Waktu total pembebasan sistem dari gangguan adalah waktu sejak munculnya gangguan, sampai bagian yang terganggu benar-benar terpisah dari bagian sistem lainnya. Kecepatan sangatlah penting untuk menghindari kerusakan secara thermis pada peralatan yang dilalui arus gangguan serta membatasi kerusakan pada alat yang terganggu, yaitu untuk mempertahankan kestabilan sistem dan untuk membatasi busur api pada gangguan disaluran udara yang akan berarti memperbesar kemungkinan berhasilnya penutupan balik PMT dan mempersingkat dead time (interval waktu buka dan tutup).

### 4. Keandalan

Kemungkinan suatu sistem proteksi dapat bekerja benar sesuai fungsi yang diinginkan dalam kondisi dan jangka waktu tertentu. Proteksi diharapkan bekerja pada saat kondisi yang diharapkan terpenuhi dan tidak boleh bekerja pada kondisi yang tidak diharapkan. Keandalan sistem proteksi terbagi menjadi tiga yaitu :

- a) Keterpercayaan (*Dependability*) yaitu keandalan kemampuan dalam bekerja. Pada prinsipnya pengaman harus dapat diandalkan bekerjanya (dapat mendeteksi dan melepaskan bagian yang terganggu), tidak boleh gagal bekerja.

- b) Keterjaminan (*Security*) yaitu tingkat kepastian untuk tidak salah kerja. Salah kerja adalah kerja yang semestinya tidak harus kerja, misalnya karena lokasi gangguan di luar lokasi pengamannya atau sama sekali tidak ada gangguan atau kerja yang terlalu cepat atau terlalu lambat. Salah kerja mengakibatkan pemadaman yang sebenarnya tidak perlu terjadi. Jadi pada prinsipnya pengaman tidak boleh salah kerja, dengan kata lain security-nya harus tinggi.
- c) *Availability* yaitu perbandingan antara waktu dimana pengaman dalam keadaan berfungsi/siap kerja dan waktu total dalam operasinya

### 2.2.1 Konsep Dasar Sistem Proteksi

Sistem proteksi listrik adalah sistem yang dirancang untuk melindungi peralatan listrik dari kerusakan akibat gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik. Sistem ini berfungsi untuk mendeteksi adanya gangguan seperti hubung singkat, arus lebih, atau gangguan tanah yang dapat merusak komponen-komponen sistem, dan kemudian mengambil tindakan untuk mengisolasi bagian yang terganggu, sehingga mencegah kerusakan lebih lanjut pada peralatan lain. Salah satu komponen utama dalam sistem proteksi adalah rele, yang bekerja dengan memonitor besaran fisik seperti arus, tegangan, atau impedansi, dan memberikan sinyal untuk memutuskan aliran listrik jika besaran tersebut melampaui nilai batas yang ditentukan. Contohnya adalah sistem proteksi arus lebih yang menggunakan rele arus lebih, yang akan bekerja jika arus melebihi nilai ambang batas tertentu [11].

Tujuan utama proteksi untuk mencegah terjadinya gangguan atau memadamkan gangguan yang telah terjadi dan melokalisirnya, dan membatasi pengaruh-pengaruhnya, biasanya dengan mengisolir bagian-bagian yang terganggu tanpa mengganggu bagian-bagian yang lain.[12]

Transformator daya juga memerlukan sistem pengamanan terhadap gangguan internal maupun eksternal. Adapun gangguan internal dan eksternal sebagai berikut [10] :

#### 1. Gangguan Internal

Penyebab gangguan internal biasanya akibat Kebocoran minyak, Gangguan pada *tap changer*, Ketidaktahanan terhadap arus besar, Gangguan pada *bushing*, Kerusakan sistem pendingin.

## 2. Gangguan Eksternal

Penyebab gangguan eksternal pada transformator daya disebabkan oleh faktor-faktor di luar transformator, seperti hubung singkat pada saluran transmisi, sambaran petir yang menyebabkan lonjakan tegangan, overload atau beban lebih, serta distorsi harmonik yang mengganggu kinerja. Selain itu, kerusakan pada peralatan eksternal seperti circuit breaker, kesalahan operasi manusia, dan kondisi lingkungan ekstrem juga dapat memicu gangguan yang merusak transformator.

Secara matematis, berbagai rumus digunakan dalam sistem proteksi untuk menentukan sensitivitas dan efektivitas operasi. Untuk proteksi arus lebih, nilai setting arus rele ( $I_{set}$ ) ditentukan dengan. [13]:

$$I_{set} = K \cdot I_{base} \quad (2.1)$$

di mana :

$K$  : Konstanta (dengan nilai 1,0–1,2 untuk proteksi sensitif dan  $\geq 1,5$  untuk proteksi aman).

$I_{set}$  : Arus setting (Ampere).

$I_{base}$  : Arus nominal (Ampere).

Hubungan untuk  $I_{base}$  adalah :

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{nominal}} \quad (2.2)$$

di mana :

$I_{base}$  : Arus nominal (Ampere).

$S_{base}$  : Kapasitas daya (Volt Ampere).

$V_{nominal}$  : Tegangan nominal (Volt).

Dalam proteksi impedansi, rele mendeteksi rasio tegangan (V) terhadap arus (I) sebagai impedansi (Z) [14]:

$$Z = \frac{V}{I} \quad (2.3)$$

di mana :

Z : Impedansi (Ohm)

V : Tegangan (Volt).

I : Arus (Ampere)

Rele akan bekerja jika nilai Z yang terukur lebih kecil dari nilai pengaturan ( $Z_{set}$ ), menandakan adanya gangguan di dalam zona proteksi. Selain itu, untuk proteksi daya lebih, daya nyata (P) dihitung dengan [14]:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi \quad (2.4)$$

di mana :

P : Daya nyata (Watt).

V : Tegangan (Volt).

I : Arus (Ampere)

$\cos \varphi$  : Faktor daya sistem.

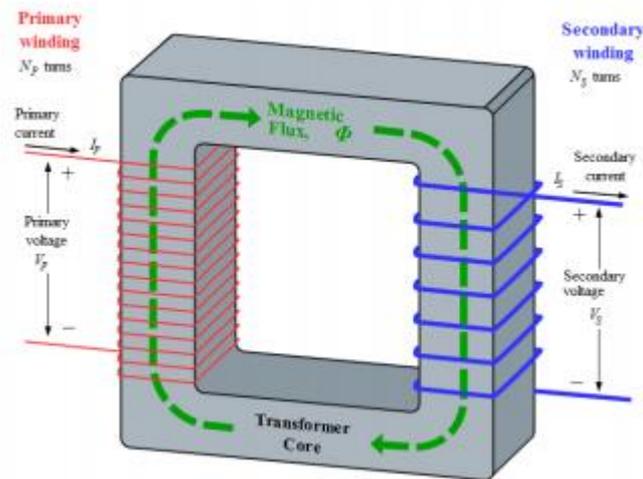
Jika P melampaui nilai batas, rele akan memutus rangkaian untuk melindungi sistem.

### 2.3 Transformator

Transformator adalah alat listrik statis yang berfungsi untuk mengubah nilai arus dan tegangan. Umumnya, transformator terdiri dari inti yang terbuat dari besi berlapis dan dua kumparan utama, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan primer terhubung ke sumber energi listrik, sedangkan kumparan sekunder menyuplai energi listrik ke beban. Transformator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik dan dapat mengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat ke tingkat yang lain dengan frekuensi yang sama sesuai dengan standar IEC 60076-1 tahun 2011 [15].

Prinsip kerja transformator yaitu induktansi *mutual* (timbal balik) antara kedua rangkaian yang dibutuhkan oleh suatu fluks magnetik bersama yang melewati suatu jalur dengan reluktansi rendah. Kedua kumparan memiliki induktansi mutual yang tinggi. Jika suatu kumparan disambungkan pada suatu

sumber tegangan bolak balik, suatu fluks bolak balik terjadi di dalam inti berlaminasi, yang sebagian besar akan mengait pada kumparan lainnya, dan di dalamnya akan terinduksi suatu gaya gerak listrik (ggl).[16]



Gambar 2. 1 Elektromagnetik pada trafo

### 2.3.1 Parameter Pada Transformator

Penjelasan mengenai parameter transformator untuk mensimulasikan dan menganalisis kinerja sistem proteksi pada transformator adalah sebagai berikut [17]:

#### 1. Rasio Transformasi

Rasio transformasi adalah perbandingan antara tegangan dan arus pada sisi primer dan sekunder transformator. Ini menentukan seberapa besar perubahan tegangan dan arus yang terjadi saat energi listrik ditransfer dari satu sisi ke sisi lainnya.

#### 2. Jenis Koneksi Transformator

Transformator dapat dihubungkan dalam konfigurasi Delta ( $\Delta$ ) atau Wye (Y). Koneksi ini memengaruhi pergeseran fasa, misalnya, koneksi  $\Delta$ -Y dapat menyebabkan pergeseran fasa sebesar  $30^\circ$ .

#### 3. Impedansi Transformator

Impedansi transformator terdiri dari impedansi positif, negatif, dan nol, yang dapat dinyatakan dalam persentase atau ohm. Impedansi ini memengaruhi aliran arus saat terjadi gangguan pada sistem.

#### 4. Arus Beban Nominal

Ini adalah arus yang mengalir pada kondisi operasi normal dan digunakan sebagai referensi untuk pengaturan rele. Arus ini penting untuk memastikan bahwa transformator beroperasi dalam batas yang aman.

#### 5. Arus Hubung Singkat (Short-Circuit Current)

Arus maksimum yang dihasilkan saat terjadi gangguan internal pada transformator. Ini adalah parameter penting untuk merancang sistem perlindungan agar dapat menangani kondisi gangguan dengan aman.

Parameter *Current Transformer* (CT) berperan penting dalam memastikan keandalan sistem proteksi differensial pada transformator daya. Rasio CT harus dirancang secara presisi untuk mencocokkan magnitudo arus primer dan sekunder, sehingga sinyal arus yang diukur sesuai dengan rasio transformator, misalnya pada sisi primer dengan rasio 800:5 dan sisi sekunder 1600:5. Polaritas CT juga harus diatur dengan benar untuk memastikan arah arus yang dihasilkan pada sisi sekunder sesuai dengan kebutuhan proteksi diferensial, guna menghindari kesalahan operasi rele proteksi. Selain itu, kapasitas beban CT harus memadai untuk mencegah saturasi pada kondisi arus maksimum, terutama selama terjadinya gangguan sistem. Tegangan titik lutut (*knee point voltage*) dan kelas akurasi, seperti 5P10, menjadi parameter penting dalam menjaga akurasi pengukuran selama kondisi gangguan besar. Oleh karena itu, simulasi dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh parameter-parameter tersebut terhadap kinerja proteksi rele differensial, sedangkan analisis kinerja bertujuan untuk menentukan parameter optimal yang dapat memastikan deteksi gangguan internal dan eksternal secara andal tanpa memicu kesalahan proteksi pada kondisi normal.[18].

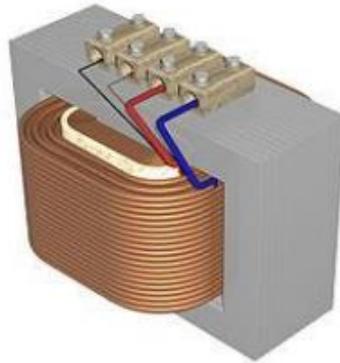
### 2.3.2 Struktur dan Komponen Utama Transformator

Transformator terdiri dari beberapa bagian komponen utama untuk mendukung keandalannya. Ada beberapa bagian pada transformator sebagai berikut:

#### 1. Kumparan Trafo

Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan

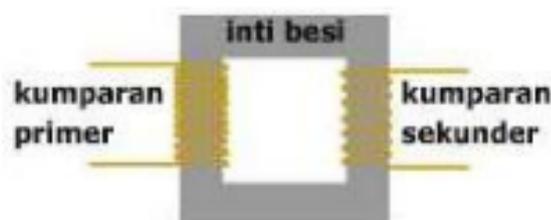
isolasi padat seperti karton, pertinax dan lain-lain. Umumnya pada trafo terdapat kumparan primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan/arus bolak-balik maka pada kumparan tersebut timbul fluksi yang menginduksikan tegangan, bila pada rangkaian sekunder ditutup (rangkaiian beban) maka akan mengalir arus pada kumparan ini. Jadi kumparan sebagai alat transformasi tegangan dan arus.[19]



Gambar 2. 2 Kumparan transformator

## 2. Inti besi

Suatu transformator terdiri atas beberapa bagian yang mempunyai fungsi masing-masing: Bagian utama adalah Inti besi. Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluksi, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan besi tipis yang berisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh “Eddy Current”. [19]



Gambar 2. 3 Inti besi transformator

## 3. Bushing

*Bushing* merupakan sebuah konduktor (porselin) yang menghubungkan transformator dengan jaringan luar. Bushing terdiri dari sebuah konduktor yang

diselubungi oleh isolator yang berfungsi sebagai penyekat antara konduktor buhsing dengan tangki transformator. Selain itu, bushing juga berfungsi sebagai pengaman hubung singkat antara kawat bertegangan dengan tangki transformator. Isolator tersebut berfungsi sebagai penyekat antara konduktor bushing dengan bodi main tank transformator.[20]



Gambar 2. 4 *Bushing*

#### 4. Pendingin

Transformator yang sedang beroperasi mempunyai suhu yang tinggi, suhu pada transformator dipengaruhi oleh rugi-rugi, kualitas tegangan jaringan, dan suhu lingkungan. Sistem pendingin ini mempunyai peran yang sangat penting karena apabila suhu transformator dalam nilai yang tinggi maka akan menyebabkan kerusakan pada bahan isolasi. Minyak isolasi transformator tidak hanya berperan sebagai media isolasi, tetapi juga berfungsi sebagai pendingin. Saat minyak mengalir, panas yang dihasilkan oleh belitan transformator akan dibawa oleh minyak sesuai dengan jalur sirkulasinya, dan kemudian didinginkan melalui sirip sirip radiator. Proses pendinginan ini dapat ditingkatkan efisiensinya dengan bantuan kipas dan pompa sirkulasi untuk mempercepat aliran minyak dan meningkatkan efisiensi pendinginan [20].

#### 5. Minyak trafo

Sebagian besar trafo tenaga kumparan kumparan dan intinya direndam dalam minyak-trafo, terutama trafo-trafo tenaga yang berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai media pemindah panas (disirkulasi) dan

bersifat pula sebagai isolasi (daya tegangan tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi.

### **2.3.3 Sistem Proteksi Transformator**

Sistem proteksi transformator adalah suatu bentuk perlindungan yang dirancang untuk menjaga kinerja dan keandalan transformator dalam sistem tenaga listrik. Proteksi ini penting karena transformator sering mengalami gangguan yang dapat menghambat operasionalnya. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan proteksi yang stabil untuk menjaga kelancaran operasional sistem [16]. Beberapa jenis proteksi yang umum digunakan pada transformator antara lain:

#### **1. Rele differensial**

Rele ini berfungsi untuk mendeteksi ketidakseimbangan arus antara sisi primer dan sekunder transformator. Rele diferensial dapat bekerja seketika tanpa berkoordinasi dengan rele lain, sehingga waktu responnya sangat cepat [13].

#### **2. Proteksi terhadap gangguan eksternal**

Proteksi ini dirancang untuk melindungi transformator dari gangguan yang berasal dari luar, seperti petir, kebocoran, dan isolasi yang tidak memadai. Tujuannya adalah untuk mencegah kerusakan yang disebabkan oleh faktor eksternal yang dapat mengganggu operasional transformator [16].

#### **3. Proteksi kebocoran**

Sistem ini berfungsi untuk mendeteksi dan mencegah kebocoran arus yang dapat merusak transformator. Proteksi kebocoran penting untuk menjaga integritas sistem dan mencegah kerusakan yang lebih serius pada peralatan [16].

## **2.4 Rele Differensial**

Rele differensial adalah perangkat proteksi yang dirancang untuk melindungi peralatan, terutama transformator, dari gangguan internal dengan mendeteksi perbedaan vektor antara dua besaran listrik atau lebih. Rele ini bekerja dengan prinsip perbandingan arus pada sisi primer dan sekunder transformator, di mana dalam kondisi normal arus memiliki perbandingan dan sudut fase tertentu sehingga rele tidak aktif [21]. Namun, ketika terjadi gangguan, perubahan pada perbandingan

dan sudut fase arus akan memicu operasi rele diferensial untuk melindungi transformator [16].

#### 2.4.1 Prinsip Kerja Rele Diferensial

Prinsip kerja rele ini didasarkan pada hukum arus Kirchhoff, yang menyatakan bahwa jumlah arus yang masuk ke suatu titik sama dengan jumlah arus yang keluar. Jika arus differensial yang terdeteksi melebihi nilai setting yang telah ditentukan, rele akan memberikan sinyal untuk menghentikan operasi transformator guna mencegah kerusakan lebih lanjut. Rele diferensial merupakan bagian penting dari sistem proteksi transformator daya, bersama dengan proteksi lain seperti *Over Current Relay* dan *Relay Buchholz* [16].

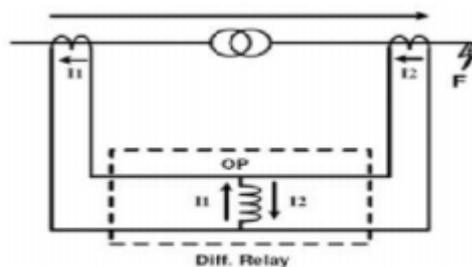
Adapun prinsip kerja rele differensial ini terjadi dalam tiga keadaan, yaitu dalam keadaan normal, keadaan gangguan diluar daerah proteksi dan gangguan didalam daerah proteksi [22] :

##### 1. Rele diferensial pada keadaan normal

Dalam keadaan normal, arus mengalir melalui peralatan / inslatasi listrik yang diproteksi yaitu transformator daya, dan arus-arus tranformator arus, yaitu  $I_1$  dan  $I_2$  bersirkulasi melalui “path”  $I_A$ . Jika rele diferensial dipasang antara terminal 1 dan terminal 2, maka dalam kondisi normal tidak akan ada arus yang mengalir melaluinya.

##### 2. Rele diferensial pada gangguan di luar proteksi

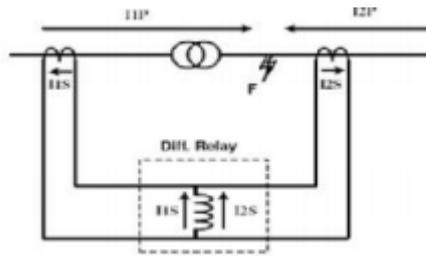
Bila dalam keadaan gangguan di luar dari transformator daya yang diproteksi (*external fault*), maka arus yang mengalir akan bertambah besar, akan tetapi sirkulasi akan tetap sama dengan pada kondisi normal dengan demikian rele diferensial tidak akan bekerja



Gambar 2. 5 Rele diferensial kondisi gangguan diluar

### 3. Rele diferensial pada gangguan di dalam proteksi.

Jika gangguan terjadi didalam proteksinya pada transformator daya yang diproteksi (*internal fault*), maka arah sirkulasi arus disalah satu sisi akan terbalik, menyebabkan “keseimbangan” pada kondisi normal terganggu, akibatnya arus  $I_d$  akan mengalir melalui rele diferensial dari terminal 1 menuju ke terminal 2 maka terjadi selisih arus di dalam rele, selanjutnya rele tersebut akan mengoperasikan CB untuk memutus.



Gambar 2. 6 Rele diferensial kondisi gangguan didalam

Rele diferensial bekerja secepat mungkin saat terjadi gangguan dan tidak dapat dijadikan sebagai relai cadangan karena pemasangannya dibatasi oleh kedua arus trafo di sisi masuk dan keluar. Prinsip kerja rele diferensial didasarkan pada metode keseimbangan arus, sesuai dengan hukum arus Kirchhoff, yang menyatakan bahwa arus yang masuk sama dengan arus yang keluar pada titik penyambungan. Arus diferensial merupakan arus selisih antara arus sekunder CT di sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah [23].

Kinerja rele diferensial dijelaskan dengan membandingkan arus pada sisi primer dan sisi sekunder. Dalam kondisi normal, arus yang mengalir melalui peralatan listrik yang dilindungi akan bersirkulasi melalui loop pada kedua sisi di daerah kerja rele diferensial, sehingga tidak ada perbedaan arus yang memicu kerja rele. Namun, jika terjadi gangguan, rele diferensial akan mendeteksi perbedaan arus antara sisi primer dan sisi sekunder, lalu mengirimkan perintah trip untuk memutuskan sistem. Rumus yang digunakan adalah:

$$I_{diferensial} = I_P - I_S \quad (2.5)$$

Di mana:

$I_d$  : Arus differensial (Ampere).

$I_p$  : Arus pada sisi primer (Ampere).

$I_s$  : Arus pada sisi sekunder (Ampere).

Jika  $I_{\text{diferensial}} \neq 0$ , rele diferensial akan bekerja. Rumus awal  $I_p = I_s$  hanya berlaku untuk kondisi normal, tetapi harus dikoreksi dengan menambahkan perbedaan arus untuk mencerminkan prinsip kerja rele diferensial secara lebih akurat [24].

Rele diferensial bekerja berdasarkan prinsip perbandingan arus yang mengalir melalui peralatan listrik, seperti generator atau transformator, untuk mendeteksi gangguan internal. Pada kondisi normal, arus yang melewati trafo arus (CT) primer dan sekunder seimbang ( $I_1 = I_2$ ), sehingga tidak ada arus diferensial yang memicu kerja rele. Jika gangguan terjadi di luar zona proteksi, rele diferensial tetap tidak aktif karena arus gangguan berada di luar wilayah kerjanya. Namun, ketika gangguan terjadi di dalam zona proteksi, ketidakseimbangan arus muncul, misalnya arus pada sisi primer CT ( $I_1$ ) tetap ada, sedangkan pada sisi sekunder CT ( $I_2$ ) menjadi nol akibat gangguan. Ketidakseimbangan ini menghasilkan arus diferensial ( $I_1 \neq I_2$ ) yang signifikan, sehingga rele diferensial memicu sistem untuk memutus arus guna melindungi peralatan dari kerusakan lebih lanjut. Prinsip ini memastikan rele diferensial hanya bekerja pada gangguan internal, menjaga keamanan dan keandalan sistem kelistrikan [10].

1. Dalam kondisi normal:

$$I_1 = I_2 \quad (2.6)$$

2. kondisi gangguan di luar daerah pengamanan (Rele tidak berkreja):

$$I_1 = I_2 \quad (2.7)$$

3. Dalam kondisi gangguan di dalam daerah pengamanan (Rele berkerja):

$$I_1 \neq I_2 \quad (2.8)$$

4. Hubungan arus diferensial:

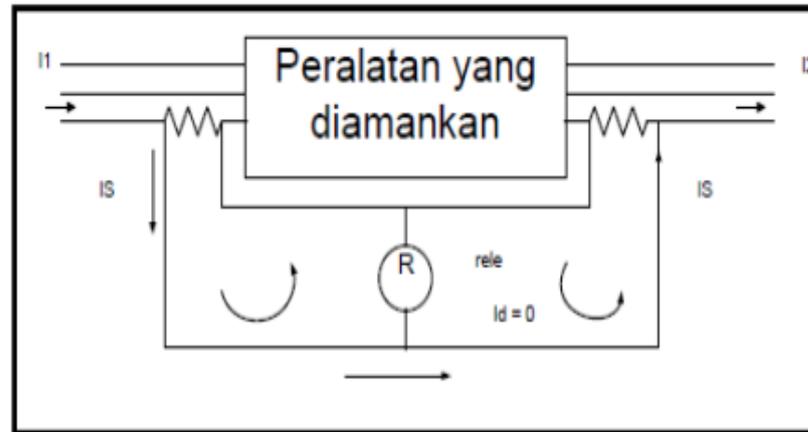
$$I_{\text{diferensial}} = I_1 - I_2 \quad (2.9)$$

#### 2.4.2 Jenis-jenis Rele Diferensial

Rele differensial memiliki beberapa jenis yang digunakan dalam sistem proteksi, antara lain [8]:

### 1. Rele Arus Diferensial

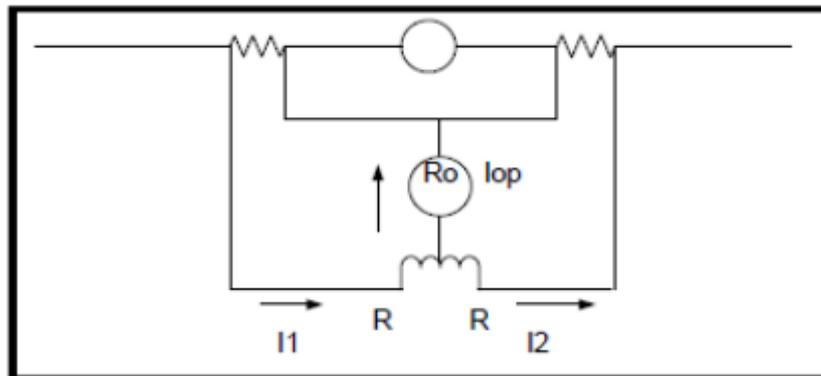
Rele arus diferensial menggunakan besaran-besaran arus yang masuk dan yang keluar dari peralatan yang diamankan untuk dibandingkan di dalam sirkit diferensial. Setiap perbedaan arus digunakan untuk menggerakkan rele tersebut dengan demikian masing-masing fasa dibandingkan.



Gambar 2. 7 Rele arus diferensial

### 2. Rele Persentase Diferensial

Telah diuraikan cara kerja rele arus diferensial, maka untuk rele persentase diferensial mempunyai ciri kerja yang hampir sama dengan rele arus diferensial, hanya saja rangkaian diferensialnya melalui kumparan penahan (*restraining coil*). Arus diferensial yang diperlukan untuk mengerjakan rele mempunyai besaran yang bervariasi, dengan perkataan lain dimungkinkan adanya *setting* rele. Arus diferensial yang mengalir masuk ke rele sebanding dengan  $(I_1 - I_2)$  dan arus yang mengalir dalam restrain coil sebanding dengan  $(I_1 + I_2) / 2$  karena kumparan kerja dihubungkan ditengah kumparan penahan (*restraining coil*).



Gambar 2. 8 Rele persentase diferensial

## 2.5 Kinerja Sistem Proteksi Rele Diferensial

Kinerja sistem proteksi relai diferensial adalah kemampuan relai diferensial untuk mendeteksi keadaan operasi abnormal pada transformator daya dengan membandingkan arus yang mengalir pada kedua terminal kumparan. Relai ini berfungsi untuk mendeteksi perbedaan arus yang tidak proporsional sebagai indikator adanya gangguan, dan selanjutnya mengirim sinyal ke pemutus daya untuk memutuskan suplai daya pada transformator [14]. Adapun Parameter dari analisis kinerja rele differensial meliputi:

### 1. Arus Restrain ( $I_r$ )

Arus Restrain ( $I_r$ ) adalah arus yang membantu membatasi sensitivitas rele differensial agar hanya mendeteksi gangguan internal dan eksternal bukan kondisi transien.

$$I_r = \frac{I_{primer} - I_{sekunder}}{2} \quad (2.10)$$

Di mana:

$I_r$  : Arus restrain (Ampere).

$I_p$  : Arus pada sisi primer (Ampere).

$I_s$  : Arus pada sisi sekunder (Ampere).

### 2. Waktu Tunda

Waktu tunda dan waktu operasi diukur dalam detik (s) karena ini mengacu pada durasi waktu yang diperlukan oleh relai untuk merespons gangguan.

$$t_{operasi} = t_{deteksi} + t_{setting} \quad (2.11)$$

Di mana:

$I_{operasi}$  : Waktu operasi relai untuk merespons gangguan (s).

$I_{deteksi}$  : Waktu untuk mendeteksi gangguan (s).

$I_{setting}$  : Waktu tunda yang ditetapkan (s).

### 3. Karakteristik CT (Current Transformer)

Kualitas dan rasio dari trafo arus yang mempengaruhi kinerja rele differensial.

$$Rasio\ CT = \frac{I_p}{I_s} \quad (2.12)$$

Di mana:

Rasio CT : Rasio transformasi arus.

$I_{primer}$  : Arus pada sisi primer (Ampere).

$I_{sekunder}$  : Arus pada sisi sekunder (Ampere).

#### 2.5.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kinerja

Kinerja sistem proteksi dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling terkait. Keakuratan perangkat seperti transformator arus (CT) dan transformator tegangan (VT) memainkan peran penting dalam mendeteksi gangguan secara tepat. Selain itu, pengaturan parameter proteksi seperti ambang arus diferensial ( $I_d$ ) dan waktu tunda perlu disesuaikan dengan kondisi operasi sistem untuk memastikan respons yang optimal. Faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan getaran juga dapat memengaruhi sensitivitas perangkat proteksi, sehingga perlu perhatian khusus dalam instalasi dan pemeliharannya. Terakhir, koordinasi yang baik antar perangkat proteksi memastikan bahwa respons terhadap gangguan hanya terjadi di area yang terpengaruh tanpa mengganggu bagian lain dari sistem tenaga listrik. Adapun faktor-faktor yang memengaruhi kinerja sistem proteksi, yaitu [14]:

##### 1. Keakuratan perangkat pengukuran

Transformator arus (CT) dan transformator tegangan (VT) harus memiliki akurasi tinggi untuk memastikan deteksi gangguan yang tepat.

## 2. Pengaturan parameter proteksi

Ambang arus diferensial ( $I_d$ ), waktu tunda, dan sensitivitas harus diatur sesuai dengan karakteristik sistem untuk memastikan respons yang optimal.

## 3. Faktor lingkungan

Suhu, kelembapan, dan getaran di sekitar perangkat proteksi dapat memengaruhi sensitivitas dan keandalan perangkat.

## 4. Koordinasi antar perangkat proteksi

Sistem proteksi harus dirancang untuk bekerja secara terkoordinasi, sehingga hanya area yang terkena gangguan yang diproteksi tanpa memengaruhi area lain.

## 5. Kualitas instalasi perangkat

Pemasangan perangkat yang tidak sesuai standar dapat mengurangi efektivitas proteksi, seperti pemasangan CT atau VT yang tidak presisi.

## 6. Pemeliharaan dan pengujian rutin

Pemeliharaan yang tidak memadai dapat menyebabkan penurunan kinerja sistem proteksi, terutama dalam mendeteksi dan menangani gangguan.

## 7. Kondisi beban sistem

Variasi beban sistem tenaga listrik dapat memengaruhi pengaturan parameter proteksi, sehingga perlu disesuaikan dengan kondisi operasi yang aktual.

## 8. Penggunaan perangkat lunak simulasi

Keterbatasan dalam pemodelan sistem proteksi pada perangkat lunak simulasi dapat memengaruhi keakuratan analisis kinerja proteksi.

### **2.5.2 Evaluasi Operasional**

Evaluasi operasional sistem proteksi diferensial pada transformator daya dilakukan dengan menganalisis arus diferensial yang mengalir melalui transformator untuk memastikan sistem proteksi bekerja dengan baik dalam mendeteksi gangguan internal dan melindungi transformator dari kerusakan. Proses evaluasi melibatkan beberapa langkah berikut: [8]

#### 1. Rumus arus diferensial

Arus diferensial ( $I_d$ ) dapat dihitung untuk mengetahui perbedaan antara arus pada sisi primer dan sekunder transformator. Rumus yang digunakan adalah:

$$I_d = I_1 - I_2$$

Di mana:

$I_d$  : Arus differensial (Ampere).

$I_1$  : Arus pada sisi primer (Ampere).

$I_2$  : Arus pada sisi sekunder (Ampere).

## 2. Setting rele differensial

Setting relai differensial ( $I_{set}$ ) adalah nilai arus penahan yang digunakan untuk mendeteksi gangguan. Nilai setting ini ditentukan berdasarkan karakteristik sistem dan jenis gangguan yang diharapkan. Rumus untuk menentukan setting relai diferensial adalah:

$$I_{set} = K \cdot I_d \quad (2.13)$$

Di mana:

$I_{set}$  : Arus setting (Ampere).

$K$  : Konstanta (dengan nilai 1,0–1,2 untuk proteksi sensitif dan  $\geq 1,5$  untuk proteksi aman).

$I_d$  : Arus diferensial (Ampere).

## 3. Evaluasi kinerja

Kinerja sistem proteksi dapat dievaluasi dengan memeriksa apakah relai diferensial memberikan sinyal trip saat terjadi gangguan. Jika arus diferensial ( $I_d$ ) melebihi nilai setting ( $I_{set}$ ), rele differensial harus berfungsi untuk memutuskan sirkuit. Sistem proteksi dikatakan berhasil jika relai berfungsi sesuai dengan pengaturan yang telah ditentukan.

## 4. Pengujian simulasi

Simulasi dilakukan untuk berbagai jenis gangguan, baik itu gangguan satu fase maupun tiga fase, guna mengevaluasi respons sistem proteksi. Hasil simulasi dianalisis menggunakan grafik arus dan tegangan untuk memastikan bahwa sistem proteksi dapat mendeteksi gangguan dengan akurat dan memutuskan aliran listrik sesuai dengan kebutuhan.

## 5. Analisis hasil

Setelah melakukan simulasi dan pengujian, hasil yang diperoleh harus dianalisis dengan cermat untuk memastikan bahwa Relai diferensial dapat mendeteksi arus abnormal dengan tepat dan sistem proteksi dapat memutuskan aliran listrik

dalam waktu yang tepat untuk melindungi transformator dari kerusakan lebih lanjut.

## 2.6 Keandalan Sistem Proteksi

Keandalan sistem proteksi sangat penting untuk menjaga keamanan dan kontinuitas operasi transformator daya dalam sistem tenaga listrik. Sistem proteksi yang andal tidak hanya mampu mendeteksi gangguan dengan cepat, tetapi juga memastikan gangguan tersebut ditangani tanpa memengaruhi bagian lain dari sistem. Pada rele differensial, keandalan menjadi aspek utama karena transformator daya merupakan komponen kritis yang harus dilindungi dari kerusakan akibat gangguan internal seperti hubung singkat antar lilitan. Keandalan dalam konteks sistem proteksi melibatkan kemampuan perangkat untuk bekerja secara efektif dalam berbagai kondisi operasi. Evaluasi keandalan mencakup analisis terhadap kemungkinan kegagalan perangkat, waktu respons terhadap gangguan, dan ketahanan terhadap pengaruh lingkungan. Pada transformator daya, sistem proteksi harus memastikan bahwa setiap gangguan yang terdeteksi benar-benar berada dalam zona proteksi, sehingga mencegah aktivasi proteksi yang tidak diperlukan (*false tripping*) [25].

### 2.6.1 Parameter Keandalan

Keandalan sistem proteksi dapat diukur melalui beberapa parameter utama yang saling berkaitan. Sensitivitas menjadi salah satu aspek penting, di mana sistem harus mampu mendeteksi gangguan kecil berdasarkan perbedaan arus antara sisi primer dan sekunder transformator, dengan respon hanya ketika nilai  $I_d$  melebihi ambang batas yang ditetapkan. Selain itu, selektivitas diperlukan untuk memastikan bahwa perlindungan terbatas pada zona gangguan, sehingga menghindari pemutusan daya yang tidak diperlukan di area lain. Parameter kecepatan respons juga menjadi perhatian utama, di mana sistem proteksi harus bereaksi dengan waktu tunda minimum dalam rentang milidetik untuk menghindari kerusakan lebih lanjut. Tingkat keandalan operasional perangkat dihitung menggunakan formula, yaitu :

$$A = \frac{MTTF}{MTTF + MTTR} \quad (2.14)$$

di mana :

$A$  : *Availability*.

$MTTF$  : *Mean Time to Failure* (h).

$MTTR$  : *Mean Time to Repair* (h).

Untuk mengukur probabilitas sistem berfungsi dengan baik saat dibutuhkan, dengan mempertimbangkan waktu rata-rata hingga kegagalan  $MTTF$  (*Mean Time to Failure*) dan waktu rata-rata perbaikan  $MTTR$  (*Mean Time to Repair*) [26]. Keandalan sistem proteksi dapat diukur melalui beberapa parameter utama yang saling berkaitan, yaitu:

#### 1. Sensitivitas

Sensitivitas merupakan kemampuan sistem proteksi untuk mendeteksi gangguan kecil yang terjadi di dalam zona proteksi. Sistem proteksi harus dirancang agar bereaksi hanya ketika arus diferensial ( $I_d$ ) melebihi ambang batas tertentu, sehingga dapat mengidentifikasi gangguan internal secara akurat tanpa terpengaruh oleh gangguan eksternal atau noise.

#### 2. Selektivitas

Selektivitas memastikan bahwa hanya perangkat proteksi pada zona yang terganggu yang bekerja, sedangkan perangkat proteksi di zona lain tetap tidak aktif. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan pemadaman yang tidak diperlukan dan menjaga kelangsungan operasi di area yang tidak terdampak gangguan.

#### 3. Kecepatan Respons

Kecepatan respons adalah kemampuan sistem proteksi untuk bereaksi terhadap gangguan dalam waktu yang sangat singkat, biasanya dalam rentang milidetik. Parameter ini penting untuk mengurangi risiko kerusakan lebih lanjut pada peralatan atau sistem tenaga listrik akibat gangguan yang berlarut-larut.

### 2.6.2 Pendekatan dalam Pengukuran Keandalan

Pengukuran keandalan dilakukan melalui simulasi skenario gangguan internal dan eksternal menggunakan perangkat lunak seperti Matlab Simulink. Pendekatan ini memungkinkan analisis sensitivitas, selektivitas, dan kecepatan

respons rele differensial dalam berbagai kondisi operasi. Hasil simulasi digunakan untuk mengidentifikasi potensi kelemahan sistem proteksi dan melakukan optimasi parameter seperti ambang arus diferensial ( $I_d$ ) dan waktu tunda.

Selain simulasi, analisis statistik terhadap kemungkinan kegagalan perangkat proteksi juga dilakukan. Faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan vibrasi dianalisis untuk memahami pengaruhnya terhadap kinerja perangkat. Dengan mengintegrasikan hasil simulasi dan data statistik, keandalan sistem proteksi dapat ditingkatkan melalui penyesuaian desain dan strategi pemeliharaan. Pendekatan ini membantu memastikan bahwa sistem proteksi dapat bekerja secara optimal dalam melindungi transformator daya dari kerusakan akibat gangguan.

## **2.7 Matlab Simulink**

Matlab Simulink adalah alat yang digunakan untuk pemodelan, simulasi, dan analisis sistem dinamis, termasuk dalam sistem tenaga listrik. Dalam konteks ini, Simulink memungkinkan pengguna untuk memodelkan sistem distribusi tenaga listrik, seperti transformator dan rele diferensial, serta mensimulasikan berbagai skenario gangguan untuk menganalisis respons sistem terhadap gangguan tersebut. Pemodelan sistem proteksi diferensial menggunakan Simulink memungkinkan identifikasi perbedaan arus antara sisi primer dan sekunder transformator, sehingga membantu dalam merancang dan menguji sistem proteksi untuk memastikan rele diferensial berfungsi optimal dalam mendeteksi gangguan. Pengujian dilakukan pada berbagai jenis gangguan, seperti gangguan tiga fasa dan satu fasa, guna mengevaluasi kinerja sistem secara menyeluruh [8].

Simulink dapat diterapkan untuk berbagai aspek proteksi pada transformator daya. Pertama, Simulink digunakan untuk mensimulasikan sistem proteksi, seperti rele proteksi arus lebih dan rele proteksi hubung tanah, guna menganalisis respons sistem terhadap gangguan internal dan memastikan bahwa rele berfungsi dengan baik untuk melindungi transformator dari kerusakan. Kedua, Simulink dapat digunakan untuk menganalisis pembebanan pada transformator daya dan dampaknya terhadap umur pakai, dengan memodelkan kondisi beban yang berbeda untuk mengidentifikasi potensi masalah dan merancang strategi proteksi yang sesuai. Selain itu, Simulink juga dapat mensimulasikan sistem pendinginan

transformator daya, dengan memodelkan aliran minyak dan suhu, untuk memastikan transformator beroperasi dalam batas suhu yang aman, sehingga mengurangi risiko kerusakan akibat overheating. Terakhir, Simulink memungkinkan pemantauan suhu dan kualitas minyak transformator daya secara *real-time*, dengan menggunakan sensor dan model matematis untuk memberikan peringatan dini terhadap indikasi masalah, sehingga memungkinkan tindakan pencegahan sebelum kerusakan lebih lanjut terjadi [27].

Adapun beberapa poin cara sistem proteksi melindungi transformator menggunakan Matlab Simulink [8]:

#### 1. Pemodelan sistem

Sistem proteksi differensial dapat dimodelkan dalam Simulink dengan menggambarkan transformator, trafo arus, dan rele differensial. Model ini memungkinkan analisis yang lebih baik terhadap perilaku sistem saat terjadi gangguan.

#### 2. Simulasi gangguan

Simulink memungkinkan pengguna untuk mensimulasikan berbagai jenis gangguan, seperti gangguan hubung singkat, untuk mengamati respons sistem proteksi. Ini membantu dalam memahami bagaimana rele differensial akan bereaksi terhadap kondisi abnormal.

#### 3. Analisis arus differensial

Dengan menggunakan Simulink, arus differensial ( $I_d = I_1 - I_2$ ) dapat dihitung dan dianalisis. Ini penting untuk menentukan apakah arus yang terukur melebihi ambang batas yang ditetapkan untuk memicu relai.

#### 4. Pengaturan rele

Pengguna dapat mengatur parameter relai diferensial, seperti setting arus dan slope, untuk memastikan bahwa relai berfungsi dengan optimal dalam mendeteksi gangguan.

#### 5. Evaluasi kinerja

Hasil simulasi dapat dievaluasi untuk memastikan bahwa sistem proteksi dapat mendeteksi gangguan dengan cepat dan akurat, serta memutuskan sirkuit untuk melindungi transformator dari kerusakan.

#### 6. Visualisasi data

Simulink menyediakan alat untuk memvisualisasikan data arus dan tegangan, yang membantu dalam analisis dan pemahaman tentang bagaimana sistem beroperasi selama gangguan. Dengan menggunakan Matlab Simulink, insinyur dapat merancang, menguji, dan mengoptimalkan sistem proteksi untuk transformator secara efektif.

### **2.7.1 Jenis Gangguan Yang Disimulasikan**

Jenis gangguan yang disimulasikan pada transformator daya meliputi [8]:

#### **1. Gangguan Tiga Fasa (Line to Line to Line)**

Ini adalah gangguan yang terjadi secara simultan pada ketiga fase, yang dapat menyebabkan pemutusan sistem jika terdeteksi oleh relai diferensial.

#### **2. Gangguan Satu Fasa**

Gangguan ini terjadi pada salah satu fase dan dapat mempengaruhi kinerja transformator serta sistem secara keseluruhan.

#### **3. Gangguan Eksternal**

Gangguan yang terjadi di luar daerah proteksi transformator, di mana arus yang mengalir tetap sama dengan kondisi normal, sehingga relai diferensial tidak akan bekerja.

#### **4. Gangguan Internal**

Gangguan yang terjadi di dalam transformator, seperti kerusakan isolasi atau hubung singkat pada lilitan, yang dapat menyebabkan arus diferensial terdeteksi dan memicu pemutusan sirkuit.

### **2.7.2 Komponen Simulasi Pada Matlab Simulink**

Untuk mensimulasikan sistem proteksi transformator daya menggunakan MATLAB Simulink, beberapa komponen yang perlu disertakan adalah [8]:

#### **1. Sumber Tiga Fasa**

Komponen ini berfungsi sebagai sumber energi untuk sistem, biasanya berupa generator tiga fasa.

#### **2. Transformator**

Komponen utama yang akan dianalisis. Transformator ini dapat disimulasikan dengan parameter yang sesuai, seperti rasio transformasi dan impedansi.

### 3. Trafo Arus (CT)

Digunakan untuk mengukur arus yang mengalir melalui transformator. CT ini penting untuk sistem proteksi diferensial.

### 4. Trafo Tegangan (VT)

Digunakan untuk mengukur tegangan pada sisi primer dan sekunder transformator.

### 5. Rele Differensial

Komponen ini berfungsi untuk mendeteksi perbedaan arus antara sisi primer dan sekunder. Rele ini akan memicu pemutusan sirkuit jika terdeteksi adanya gangguan.

### 6. Pemutus Sirkuit (Circuit Breaker)

Komponen ini digunakan untuk memutuskan aliran listrik dalam kondisi gangguan, melindungi transformator dari kerusakan lebih lanjut.

### 7. Beban RLC

Beban ini dapat disimulasikan untuk merepresentasikan beban yang terhubung ke transformator, yang dapat berupa kombinasi resistif, induktif, dan kapasitif.

### 8. Pengukuran Arus dan Tegangan

Komponen ini digunakan untuk memantau dan merekam nilai arus dan tegangan selama simulasi

## 2.7.3 Rekomendasi Parameter Optimal

Untuk memastikan sistem proteksi rele differensial yang optimal di MATLAB Simulink, beberapa komponen yang perlu digunakan dan disesuaikan adalah sebagai berikut:

#### 1. Sumber Tegangan

Gunakan komponen Three-Phase Source untuk menyediakan daya ke transformator. Sumber ini harus disesuaikan dengan tegangan nominal, frekuensi, dan impedansi sistem agar menyerupai kondisi operasional nyata. Hal ini penting untuk memastikan simulasi mencerminkan lingkungan sistem tenaga yang akurat.

#### 2. Transformator

Komponen Three-Phase Transformer (Two-Windings atau Three-Windings) digunakan untuk merepresentasikan transformator daya dalam simulasi.

Parameter seperti kapasitas (MVA), rasio tegangan, jenis koneksi (delta atau wye), dan impedansi harus diatur sesuai dengan transformator yang sedang diuji untuk memastikan hasil simulasi realistis.

### 3. Beban

Tambahkan beban menggunakan Three-Phase Parallel RLC Load untuk merepresentasikan beban sistem yang terhubung ke transformator. Beban ini dapat disesuaikan dengan berbagai kondisi operasional, seperti beban penuh, beban parsial, atau beban nol, guna menganalisis kinerja proteksi di berbagai skenario.

### 4. Pengukuran Arus

Komponen Current Measurement ditempatkan di sisi primer dan sekunder transformator untuk mengukur arus yang mengalir di kedua sisi. Data arus ini diperlukan untuk menghitung arus diferensial dan arus bias yang menjadi dasar kerja sistem proteksi.

### 5. Sistem Proteksi Rele

Gunakan MATLAB Function Block atau Embedded MATLAB Function untuk mengimplementasikan algoritma proteksi rele diferensial. Algoritma ini mencakup perhitungan arus diferensial dan arus bias, penerapan karakteristik slope, serta logika pelepasan berdasarkan parameter yang telah diatur.

### 6. Filter

Tambahkan Low-Pass Filter untuk menghilangkan harmonik atau noise yang mungkin memengaruhi sinyal arus yang diukur. Filter ini membantu meningkatkan akurasi sistem proteksi dengan memastikan bahwa hanya sinyal relevan yang diproses oleh logika rele.

### 7. Gangguan

Gunakan Three-Phase Fault Block untuk mensimulasikan berbagai skenario gangguan, seperti gangguan fasa-ke-fasa, fasa-ke-ground, atau tiga fasa. Parameter seperti lokasi, durasi, dan tipe gangguan dapat diatur untuk menguji respons sistem proteksi terhadap berbagai kondisi gangguan.

### 8. Waktu Tunda

Tambahkan komponen seperti Transport Delay atau Discrete-Time Integrator untuk mengatur waktu tunda dalam logika rele. Waktu tunda ini penting untuk

memastikan bahwa rele hanya beroperasi ketika gangguan telah terdeteksi secara valid, sehingga menghindari operasi yang tidak diinginkan selama kondisi transien.

#### 9. Pemantauan Sinyal

Gunakan Scope, To Workspace, atau Simulink Data Inspector untuk memantau sinyal-sinyal penting, seperti arus diferensial, arus bias, dan sinyal pelepasan. Komponen ini membantu menganalisis kinerja sistem proteksi dalam setiap skenario simulasi.

#### 10. Pemutus Sirkuit

Komponen Three-Phase Circuit Breaker digunakan untuk merepresentasikan perangkat pelepasan (tripping) yang akan memutuskan aliran daya ketika gangguan terdeteksi oleh sistem proteksi. Pemutus ini dikendalikan oleh sinyal tripping dari logika proteksi.

#### 11. Logika Kontrol

Tambahkan blok logika seperti Logical Operator, Relational Operator, dan Switch untuk melengkapi sistem dengan logika kontrol tambahan. Misalnya, mekanisme reset otomatis atau kondisi bypass untuk situasi tertentu dapat diterapkan untuk meningkatkan fleksibilitas dan keandalan sistem proteksi

## BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

#### 1. Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink di PT. PLN (PERSERO) UIP3B Sumatera.

#### 2. Waktu Penelitian

Pelaksanaan penelitian dimulai dari bulan Februari hingga Maret tahun 2025.

### 3.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi spesifikasi transformator daya dan parameter rele differensial, yaitu :

#### 1. Spesifikasi transformator

Mencakup tegangan primer dan sekunder, kapasitas daya, serta parameter impedansi yang digunakan untuk pemodelan.

Table 3. 1 Spesifikasi Teknis Transformator 60 MVA

| Parameter         | Nilai  | Keterangan           | Sumber Data                  |
|-------------------|--------|----------------------|------------------------------|
| Kapasitas         | 60 MVA | Daya nominal         | Laporan Operasional Jan 2025 |
| Tegangan Primer   | 150 kV | Sisi Hv              | Drawing Single Line Diagram  |
| Tegangan Sekunder | 20 kV  | Sisi LV              | Manual Operasi Transformator |
| Impedansi         | 8%     | Pada suhu kerja 75°C | Test Report Factory          |
| Frekuensi         | 50 Hz  | Standar sistem PLN   | Dokumen Spesifikasi          |

#### 2. Parameter rele differensial

Meliputi karakteristik pengaturan rele, seperti arus pick-up, kurva karakteristik kerja, dan sensitivitas terhadap gangguan. Selain itu, data simulasi mencakup skenario gangguan yang meliputi gangguan internal, seperti hubung singkat antar lilitan, serta gangguan eksternal di sisi primer atau sekunder transformator.

Semua data ini digunakan untuk membangun model simulasi di Matlab Simulink guna mengevaluasi kinerja sistem proteksi rele differensial.

### 3. Kondisi trip pada transformator

Table 3.2 laporan kondisi trip, lepas, dan masuk penyulang 20 kv / bus tie 20 kv di gardu gis listrik upt medan

| No | Penyulang | kondisi | tgl     | waktu | Beban (kV) | Arus (A) | Lama Padam (menit) | Penyebab kejadian                                |
|----|-----------|---------|---------|-------|------------|----------|--------------------|--|
| 1  | LI 6      | Trip    | 1 Juli  | 10.30 | 20.3       | 83       | 15                 | Terminating putus PH S di Gardu Hotel Danau Toba |
| 2. | LI 7      | Trip    | 6 Juli  | 11.30 | 20.3       | 90       | 20                 | Gagal masuk DS overhead, murni SKTM              |
| 3. | LI 8      | Trip    | 8 Juli  | 11.50 | 20.3       | 81       | 10                 | Penyambungan kembali OH Danau Toba               |
| 4. | LI 7      | Lepas   | 8 Juli  | 18.51 | 20.3       | 70       | 20                 | Pekerjaan merubah HUTM ke SKTM                   |
| 5. | LI 11     | Lepas   | 11 Juli | 13.08 | 20.3       | 53       | 53                 | Melepas jumperan LKH#8                           |
| 6. | LKH#10    | Trip    | 11 Juli | 14.36 | 20.5       | 52       | 22                 | Putaran phasa terbalik                           |
| 7. | LKH#8     | Lepas   | 11 Juli | 19.47 | 20.8       | 48       | 28                 | -  |

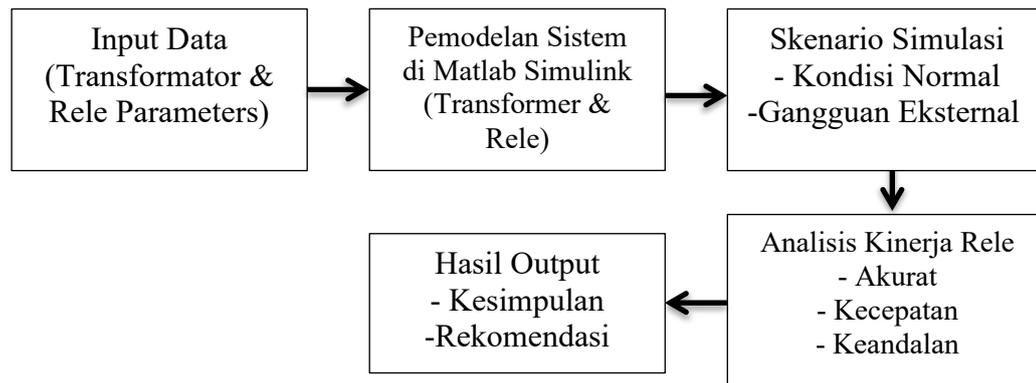
### 4. Setting rele dari UPT medan

Table 3.3 setting rele over current dan ground fault

| No | Segment            | OC Iset (%) | OC TMS | GF Iset (%) | GF TMS |
|----|--------------------|-------------|--------|-------------|--------|
| 1  | Trafo 150 kV       | 2.76        | 0.35   | 1.35        | 0.20   |
| 2  | LK-1 (ATLETIK)     | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |
| 3  | LK-2 (RENANG)      | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |
| 4  | LK-3 (SENAM)       | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |
| 5  | LK-4 (BULUTANGKIS) | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |
| 6  | LK-5 (POLO AIR)    | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |
| 7  | LK-6 (KARATE)      | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |
| 8  | LK-7 (TENIS)       | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |
| 9  | LK-8 (GOLF)        | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |
| 10 | LK-10 (ANGGAR)     | 2.50        | 0.30   | 0.75        | 0.10   |

|    |                   |      |      |      |      |
|----|-------------------|------|------|------|------|
| 11 | LK-11 (MARATON)   | 2.50 | 0.30 | 0.75 | 0.10 |
| 12 | LK-12 (TAKRAW)    | 2.50 | 0.30 | 0.75 | 0.10 |
| 13 | UGF JLL-TTK1      | 1.10 | 0.60 | 0.20 | 0.55 |
| 14 | UGF JLL-TTK2      | 1.10 | 0.60 | 0.20 | 0.40 |
| 15 | Kayu Besar 150 kV | 1.25 | –    | –    | –    |

### 3.3 Diagram Blok Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram blok penelitian

#### 3.3.1 Penjelasan Dari Diagram Blok

Blok diagram di atas menggambarkan langkah-langkah dalam simulasi dan analisis sistem proteksi menggunakan matlab simulink pada transformator dan rele. Berikut penjelasan setiap poin:

##### 1. Input Data (Transformator & Rele Parameters)

Input data parameter transformator mencakup nilai-nilai impedansi, daya nominal, tegangan nominal, dan karakteristik lainnya yang mendefinisikan kinerja transformator dalam sistem tenaga. Sementara itu, parameter rele proteksi melibatkan pengaturan arus pengenal, waktu respons, serta pengaturan lainnya yang berkaitan dengan fungsi proteksi untuk mendeteksi dan merespons gangguan dalam sistem. Kedua set parameter ini sangat penting untuk membangun model sistem proteksi yang akurat dan efektif dalam simulasi Matlab Simulink.

##### 2. System Modeling in MATLAB Simulink (Transformer & Rele)

Dalam tahap ini, model sistem transformator dan rele proteksi dibangun di Simulink. Model transformator mencakup elemen-elemen impedansi sekunder dan primer, hubungan antara tegangan dan arus, serta konfigurasi trafo step-up

atau step-down. Untuk rele proteksi, modelnya dirancang untuk mendeteksi gangguan dengan cara memonitor arus atau tegangan yang melalui sistem. Ini juga termasuk rele arus lebih, rele diferensial, atau rele dengan pengaturan waktu tertentu. Sistem modeling yang akurat sangat penting untuk mencerminkan perilaku nyata dari transformator dan rele dalam kondisi operasional yang beragam.

### 3. *Simulation Scenarios*

Pada tahap simulasi, beberapa skenario diuji untuk memverifikasi kinerja sistem proteksi dalam kondisi yang berbeda. *Normal Conditions* adalah skenario di mana sistem beroperasi tanpa adanya gangguan. Dalam kondisi ini, transformator bekerja sesuai dengan kapasitas yang ditentukan, dan rele tidak terpicu karena tidak ada gangguan yang terjadi. Skenario ini digunakan sebagai referensi untuk menganalisis bagaimana sistem seharusnya berfungsi pada kondisi ideal. Selanjutnya, *External Faults* menguji reaksi sistem proteksi terhadap gangguan yang terjadi di luar transformator, gangguan pada saluran transmisi atau sistem distribusi. Dalam simulasi ini, rele harus mampu membedakan antara gangguan eksternal dan kondisi normal, serta memberikan respons yang sesuai dengan memutuskan bagian yang terpengaruh tanpa mengganggu operasi sistem yang lain.

### 4. *Analysis of Relay Performance*

Setelah melakukan simulasi, tahap selanjutnya adalah menganalisis kinerja rele dalam berbagai kondisi. *Accuracy* mengacu pada kemampuan rele untuk mendeteksi gangguan dengan benar. Dalam hal ini, rele harus sensitif terhadap gangguan yang terjadi, seperti hubung singkat, dan harus mampu membedakan antara kondisi normal dan abnormal dengan akurat. Evaluasi akurasi juga mencakup seberapa baik pengaturan arus dan waktu rele sesuai dengan kebutuhan proteksi. Selain itu, *Speed* mengukur kecepatan respons rele terhadap gangguan. Waktu trip yang diperlukan rele untuk mendeteksi gangguan dan mengaktifkan pemutus sirkuit sangat penting dalam melindungi sistem dari kerusakan lebih lanjut. Semakin cepat rele merespons gangguan, semakin baik kinerjanya, terutama dalam menghadapi gangguan internal yang berpotensi merusak transformator. Analisis kecepatan ini akan memberikan informasi

mengenai efisiensi sistem proteksi dalam mengisolasi gangguan dan menghindari kerusakan pada komponen sistem yang lebih besar.

### 5. *Output Results*

Setelah menganalisis kinerja rele, hasil simulasi akan menghasilkan *Recommendations* yang memberikan saran untuk perbaikan sistem proteksi. Berdasarkan hasil evaluasi akurasi dan kecepatan, rekomendasi ini bisa mencakup penyesuaian pengaturan rele, seperti pengaturan waktu trip atau perubahan pengaturan arus pengenal untuk meningkatkan kinerja sistem proteksi. Jika ditemukan kelemahan dalam sistem, bisa jadi disarankan untuk mengganti jenis rele yang digunakan atau mengubah konfigurasi proteksi. Selain itu, *Conclusions* merangkum hasil dari seluruh simulasi dan analisis. Kesimpulan ini menilai apakah sistem proteksi sudah berjalan sesuai dengan yang diharapkan atau apakah perlu ada peningkatan. Kesimpulan ini juga memberikan gambaran tentang apakah model yang dibangun di Simulink sudah mencerminkan kinerja sistem yang sesungguhnya dan apakah hasil simulasi memberikan wawasan yang cukup untuk merancang sistem proteksi yang lebih baik di masa depan.

## 3.4 **Prosedur Penelitian**

Prosedur penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahapan untuk mencapai tujuan penelitian yaitu:

1. Mensimulasikan sistem proteksi rele differensial pada transformator daya 60 MVA menggunakan Matlab Simulink.

### A. Pengumpulan Data Sistem Nyata

Langkah awal yang dilakukan adalah mengumpulkan data teknis dari sistem nyata yang akan disimulasikan, yaitu transformator daya 60 MVA di Gardu Induk GIS 150 kV Titi Kuning. Data yang dikumpulkan meliputi :

- a) Diagram satu garis (Single Line Diagram) untuk memahami konfigurasi sistem dan koneksi antar peralatan.
- b) Spesifikasi teknis trafo, seperti Tegangan nominal 150/20 kV, Daya trafo 60 MVA, Impedansi trafo (%Z) dan Konfigurasi koneksi: Yg-Y atau Y-Yg.

- c) Data instrumentasi proteksi, seperti CT (Current Transformer) rating, PMT (Pemutus Tenaga) dan Posisi dan fungsi rele proteksi.

#### B. Menentukan Parameter Dasar Sistem

Setelah data terkumpul, dilakukan penurunan parameter dasar sistem sebagai acuan untuk semua nilai pada simulasi. Parameter dasar yang dihitung dan ditentukan meliputi :

- a) Tegangan dasar ( $V_{base}$ ) ditentukan dari tegangan nominal sistem (150 kV).
- b) Daya dasar ( $S_{base}$ ) 60 MVA, sesuai kapasitas transformator.
- c) Arus dasar ( $I_{base}$ ) dihitung dari  $I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}}$
- d) CT ratio (rasio transformator arus) digunakan untuk konversi arus aktual ke arus sekunder CT (misal 1500/1A atau 2000/5A).
- e) Konfigurasi koneksi transformator misalnya Yg–Y, untuk menentukan bagaimana arus dan tegangan ditransformasikan antar sisi.

#### C. Membangun Model Simulasi di MATLAB Simulink

Setelah semua parameter diketahui, dilakukan pembangunan model simulasi sistem kelistrikan menggunakan MATLAB Simulink, dengan struktur dasar:

- a) Three-Phase Voltage Source sebagai sumber tegangan 3 fasa.
- b) Transformer dengan spesifikasi 150/20 kV, 60 MVA.
- c) Circuit Breaker (PMT) pemutus tenaga di sisi primer dan sekunder.
- d) V-I Measurement Blocks untuk mengukur arus di sisi primer dan sekunder.
- e) Load (beban 3 fasa) sebagai representasi jaringan distribusi.
- f) PowerGUI untuk menyimulasikan sistem dalam domain waktu.

#### D. Membuat Logika Kerja Rele Diferensial

Langkah berikutnya adalah membuat logika kerja rele diferensial dalam bentuk subsistem pada Simulink. Logika ini mencakup :

- a) Mengambil input arus dari sisi primer dan sekunder trafo.
- b) Menghitung nilai  $I_{diff}$  dengan  $I_{diff} = |I_{primer} - I_{sekunder}|$
- c) Menghitung  $I_{bias}$  dengan  $I_{bias} = \frac{|I_{primer}| + |I_{sekunder}|}{2}$
- d) Membandingkan  $I_{diff}$  dengan ambang batas (pickup) jika  $I_{diff} > \text{threshold}$  aktifkan sinyal trip.

### E. Menjalankan Simulasi Awal (Tanpa Gangguan)

Setelah seluruh rangkaian disusun, dilakukan simulasi awal tanpa gangguan untuk memverifikasi bahwa

- a) Sistem bekerja stabil.
- b) Arus sisi primer dan sekunder hampir sama  $I_{diff} \approx 0$ .
- c) Tidak terjadi kesalahan logika atau false trip.
- d) Semua nilai berada dalam batas per unit yang wajar.

## 2. Menganalisis kinerja sistem proteksi rele differensial dalam mendeteksi gangguan eksternal pada transformator.

### A. Membuat skenario gangguan eksternal

Langkah awal adalah merancang kondisi gangguan eksternal yang terjadi di luar zona proteksi transformator. Dalam hal ini, gangguan dibuat pada sisi beban atau saluran distribusi setelah transformator, yaitu:

- a) Hubung singkat 3 fasa (three-phase fault)

Gangguan eksternal dipilih karena tidak boleh menyebabkan rele diferensial bekerja. Ini penting untuk menguji selektivitas sistem proteksi, agar hanya gangguan internal saja yang memicu trip.

### B. Menjalankan simulasi pada skenario tersebut

Setelah skenario dirancang, simulasi dijalankan menggunakan MATLAB Simulink dengan:

- a) Model sistem proteksi yang sudah lengkap
- b) Rele diferensial dalam kondisi aktif (logika trip ON)
- c) Waktu gangguan disisipkan pada titik tertentu (misalnya detik ke-0.2)

Tujuannya adalah untuk mengamati bagaimana sistem merespons saat arus gangguan tinggi mengalir di luar zona proteksi.

### C. Merekam hasil simulasi

Selama simulasi berlangsung, data berikut direkam:

- a) Arus sisi primer dan sekunder transformator
- b) Nilai  $I_{diff}$  dan  $I_{bias}$
- c) Sinyal trip dari rele (apakah aktif atau tidak)

Data ini diambil dari blok pengukuran dan scope MATLAB Simulink, dan digunakan untuk analisis grafik dan numerik.

D. Menganalisis apakah rele bekerja atau tidak

Hasil dari  $I_{diff}$  dibandingkan dengan nilai pickup threshold yang telah disetting sebelumnya. Karena gangguan terjadi di luar zona proteksi, maka:

- a)  $I_{diff}$  harus tetap kecil
- b) Rele tidak boleh mengirim sinyal trip

Jika rele tetap tidak bekerja (tidak trip), maka sistem dinyatakan selektif dan berfungsi dengan benar.

E. Menampilkan hasil dalam grafik dan table

Untuk memperjelas analisis, data hasil simulasi ditampilkan dalam:

- a) Grafik arus primer, sekunder,  $I_{diff}$ , dan sinyal trip vs waktu.
- b) Tabel berisi nilai-nilai pu, waktu gangguan, dan hasil respon rele.

Ini bertujuan untuk menunjukkan bahwa sistem tidak melakukan trip palsu, meskipun terjadi gangguan eksternal.

3. Memberikan rekomendasi parameter optimal untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi

A. Melakukan variasi nilai pickup current

Langkah awal adalah menguji berapa nilai ambang kerja (pickup) yang paling tepat. Uji coba dilakukan dengan beberapa nilai, misalnya:

- a) 0.2 pu (sensitivitas tinggi)
- b) 0.3 pu (nilai moderat)
- c) 0.4 pu (sensitivitas rendah)

Tujuannya adalah untuk melihat efeknya terhadap kinerja rele diferensial.

B. Menjalankan simulasi di setiap variasi

Setiap nilai pickup current dijalankan dalam skenario:

- a) Kondisi normal (tanpa gangguan)
- b) Kondisi gangguan eksternal

Tujuan dari simulasi ini adalah untuk mengetahui apakah perubahan nilai pickup menyebabkan sistem:

- a) Tetap stabil
- b) Menjadi terlalu sensitif (false trip)
- c) Terlalu lambat merespon

C. Menganalisis sensitivitas dan kestabilan sistem

Data dari simulasi diuji dengan mengamati:

- a) Apakah sinyal trip muncul secara tidak perlu (false trip)
- b) Apakah rele mampu mempertahankan stabilitas saat sistem beroperasi normal
- c) Apakah sistem responnya lambat atau terlalu cepat

Ini menentukan sejauh mana setting pickup memengaruhi kinerja sistem proteksi.

D. Membandingkan hasil antar variasi

Semua hasil dari simulasi masing-masing nilai pickup dibandingkan secara kuantitatif melalui:

- a) Tabel
- b) Grafik respon menunjukkan hubungan antara nilai  $I_{bias}$  dan  $I_{diff}$  terhadap trip.

Perbandingan ini penting untuk menunjukkan trade-off antara:

- a) Sensitivitas (mendeteksi gangguan kecil)
- b) Stabilitas (tidak salah trip)

E. Menentukan nilai setting yang paling optimal

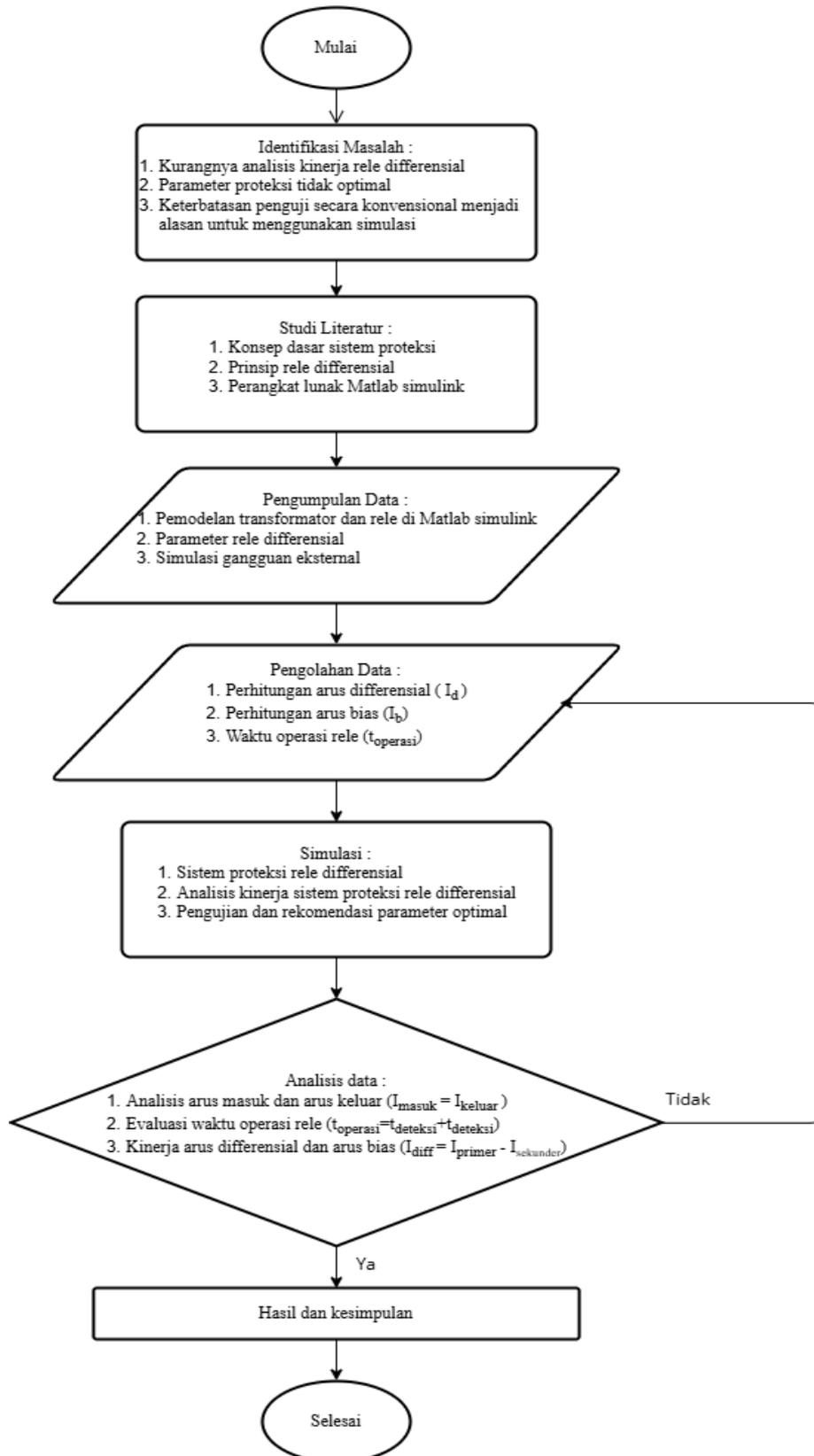
Dari hasil analisis dan perbandingan, dipilih satu nilai setting yang dianggap:

- a) Tidak menyebabkan false trip
- b) Cukup cepat merespon jika diperlukan
- c) Cocok dengan karakteristik arus dari transformator dan sistem proteksinya

Biasanya, nilai 0.3 pu menjadi pilihan yang paling seimbang, karena:

- a) Tidak terlalu sensitif hingga mudah trip
- b) Tidak terlalu kasar hingga telat bereaksi

### 3.5 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 2 Diagram alir penelitian

### 3.5.1 Penjelasan Dari Diagram Alir

Berikut adalah penjelasan dari diagram alir di atas dalam bentuk poin-poin, antaranya:

#### 1. Mulai

Proses dimulai dengan pemahaman umum tentang masalah yang ada, yang kemudian mengarah pada langkah-langkah selanjutnya.

#### 2. Identifikasi

Langkah ini bertujuan untuk mengidentifikasi permasalahan utama yang melatarbelakangi penelitian. Masalah seperti kurangnya analisis kinerja rele diferensial, parameter proteksi yang belum optimal, dan keterbatasan pengujian secara konvensional mendorong perlunya penggunaan simulasi sebagai solusi yang efisien dan akurat.

#### 3. Studi Literatur

Di tahap ini, kamu mempelajari konsep-konsep dasar terkait sistem proteksi untuk menyelesaikan masalah yang telah diidentifikasi. Studi literatur dilakukan untuk memahami konsep dasar tentang bagaimana sistem proteksi bekerja, prinsip kerja rele diferensial, serta penggunaan perangkat lunak MATLAB Simulink yang akan digunakan untuk simulasi dan pemodelan sistem proteksi dalam penelitian ini. Memahami literatur ini memberikan dasar teknis dan teoritis yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya.

#### 4. Pengumpulan Data

Setelah memahami dasar-dasar teknis, tahap selanjutnya adalah mengumpulkan data yang diperlukan untuk melakukan simulasi. Pada tahap ini, model transformator dan rele diferensial akan dibuat menggunakan perangkat lunak MATLAB Simulink. Parameter yang digunakan dalam sistem proteksi juga akan dikumpulkan, termasuk arus diferensial dan arus restrain, serta data mengenai gangguan eksternal yang akan diuji dalam simulasi untuk melihat bagaimana sistem bereaksi terhadap gangguan tersebut.

#### 5. Pengolahan Data

Setelah pengumpulan data, langkah selanjutnya adalah pengolahan data yang telah dikumpulkan untuk menganalisis kinerja sistem proteksi. Ini termasuk perhitungan arus diferensial, arus restrain, dan waktu operasi rele yang sangat

penting untuk mengetahui sejauh mana sistem proteksi bekerja dengan efektif. Data ini akan dianalisis untuk mengevaluasi apakah sistem proteksi dapat mendeteksi gangguan dengan baik dan apakah waktu responnya sesuai dengan standar yang diharapkan.

#### 6. Simulasi

Di tahap simulasi, sistem proteksi rele diferensial yang telah diprogram di MATLAB Simulink akan diuji. Simulasi gangguan dilakukan untuk memverifikasi kinerja sistem proteksi dalam kondisi gangguan eksternal. Hasil simulasi ini akan memberikan gambaran mengenai apakah sistem proteksi berfungsi dengan benar dan apakah parameter yang digunakan sudah sesuai. Dari simulasi ini, juga akan dilakukan pengujian terhadap parameter proteksi untuk mencari nilai-nilai yang optimal.

#### 7. Analisis Data

Setelah simulasi, hasil yang didapatkan akan dianalisis lebih lanjut untuk menilai kinerja sistem proteksi. Analisis ini meliputi pemeriksaan terhadap arus masuk dan keluar dari sistem, evaluasi waktu operasi rele untuk memastikan bahwa rele merespons gangguan dengan tepat, serta perbandingan antara arus diferensial dan arus restrain untuk mengevaluasi apakah proteksi berfungsi dengan benar dalam mendeteksi gangguan yang terjadi.

Apakah Data Sudah Valid?

Dari hasil analisis data, tahap ini melibatkan pemeriksaan apakah data yang diperoleh sudah valid (tidak melebihi nilai setting) atau tidak. Jika data valid, maka penelitian dapat dilanjutkan untuk menyusun kesimpulan. Jika data tidak valid, maka perlu dilakukan pengolahan ulang data untuk memperbaiki atau menyesuaikan hasil yang diperoleh dengan keadaan nyata atau sesuai dengan model yang digunakan dalam simulasi.

#### 8. Hasil dan Kesimpulan

Jika data yang diperoleh sudah valid dan analisis telah selesai, langkah selanjutnya adalah menyusun hasil dan kesimpulan. Pada tahap ini, hasil dari simulasi dan analisis data akan disajikan, termasuk rekomendasi terkait parameter optimal untuk sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya. Kesimpulan ini akan memberi panduan mengenai langkah-langkah yang

perlu diambil untuk meningkatkan kinerja proteksi dan dapat digunakan dalam aplikasi dunia nyata.

#### 9. Selesai

Proses penelitian selesai setelah kesimpulan disusun dan hasilnya disajikan. Pada titik ini, semua tahapan yang direncanakan telah diselesaikan, dan hasil dari penelitian tersebut dapat dijadikan referensi atau rekomendasi untuk meningkatkan kinerja sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya, baik dalam penelitian lebih lanjut atau implementasi praktis di lapangan.

## **BAB 4**

### **HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN**

#### **4.1 Analisis data gangguan sistem**

Analisis data gangguan sistem dilakukan untuk memahami karakteristik gangguan yang terjadi pada transformator daya dan jaringan yang terhubung. Data gangguan diperoleh dari pencatatan sistem proteksi di Gardu Induk GIS 150 kV Titi Kuning. Informasi ini digunakan sebagai acuan untuk menentukan parameter simulasi pada MATLAB Simulink sehingga model yang dibangun dapat merepresentasikan kondisi nyata.

Gangguan pada sistem tenaga listrik dapat diklasifikasikan menjadi gangguan internal dan gangguan eksternal. Gangguan internal terjadi di dalam zona proteksi transformator, seperti kerusakan lilitan atau hubung singkat internal, sedangkan gangguan eksternal terjadi di luar zona proteksi, seperti hubung singkat pada jaringan distribusi. Penelitian ini difokuskan pada gangguan eksternal, karena tujuan utama adalah menguji kestabilan rele diferensial agar tidak salah bekerja (*false trip*) ketika gangguan terjadi di luar transformator.

Berdasarkan data pencatatan, gangguan eksternal yang dianalisis berupa hubung singkat tiga fasa di sisi sekunder transformator. Gangguan ini menyebabkan lonjakan arus pada kedua sisi CT, namun karena arus yang mengalir relatif sama besar, nilai arus diferensial ( $I_{diff}$ ) tetap rendah. Kondisi ini menjadi tantangan bagi sistem proteksi diferensial, karena jika setting rele terlalu sensitif, rele dapat salah mengidentifikasi gangguan eksternal sebagai gangguan internal dan mengeluarkan perintah trip.

##### **4.1.1 Sumber data gangguan**

Data gangguan diambil dari laporan resmi PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera – UPT Medan, yang mencatat kejadian trip, lepas, maupun masuk pada penyulang dan bus tie Gardu Induk GIS Titi Kuning selama Juli.

Setiap catatan gangguan mencakup nama penyulang/bus tie, jenis gangguan, tanggal dan waktu kejadian, tegangan dan arus pada saat gangguan, lama padam (menit), energi padam (kWh), dan penyebab kejadian.

Tabel 4.1 Rekapitulasi gangguan penyulang/bustie 20 kv – gardu induk gis titi kuning

| No | Penyulang / Bus Tie | Jenis Gangguan | Waktu | Tegangan (kV) | Arus (A) | Lama Padam (menit) | Energi Padam (kWh) | Penyebab                        |
|----|---------------------|----------------|-------|---------------|----------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| 1  | LI 6                | Trip           | 10.30 | 20.3          | 83       | 15                 | 620.13             | <i>Terminating</i> putus fasa S |
| 2  | LI 7                | Trip           | 11.30 | 20.3          | 90       | 20                 | 4,702.01           | Gagal masuk DS overhead         |
| 3  | LI 8                | Trip           | 11.50 | 20.3          | 81       | 10                 | 0.00               | Penyambungan kembali OH         |
| 4  | LI 7                | Lepas          | 18.51 | 20.3          | 70       | 20                 | 199.24             | Perubahan HUTM ke SKTM          |
| 5  | LI 11               | Lepas          | 13.08 | 20.3          | 53       | 53                 | 5,270.45           | Pelepasan jumper LKH#8          |
| 6  | LKH#10              | Trip           | 14.36 | 20.5          | 52       | 22                 | 2,824.86           | Putaran fasa terbalik           |
| 7  | LKH#8               | Lepas          | 19.47 | 20.8          | 48       | 28                 | 112.12             | Tidak tercatat                  |

Analisis Statistik Gangguan:

1). Total Lama Padam =

$$15 + 20 + 10 + 20 + 53 + 22 + 28 = 168 \text{ Menit}$$

2). Total Energi Padam =

$$620.13 + 4702.01 + 0 + 199.24 + 5270.45 + 2824.86 + 112.12 = 13,728.81 \text{ kWh.}$$

3). Persentase energi padam per ganggua

| Penyulang    | Energi Padam (kWh) | Persentase (%) |
|--------------|--------------------|----------------|
| LI 6         | 620.13             | 4.52           |
| LI 7 (Trip)  | 4,702.01           | 34.27          |
| LI 8         | 0.00               | 0.00           |
| LI 7 (Lepas) | 199.24             | 1.45           |
| LI 11        | 5,270.45           | 38.40          |
| LKH#10       | 2,824.86           | 20.57          |
| LKH#8        | 112.12             | 0.82           |

Interpretasi data :

- 1). Gangguan terbesar dari sisi energi padam terjadi pada LI 11 (5,270.45 kWh) dan LI 7 (4,702.01 kWh).
- 2). Gangguan dengan durasi terlama adalah LI 11 (53 menit) akibat pelepasan jumper.

- 3). Sebagian gangguan (misalnya LI 8) memiliki energi padam 0 kWh, yang menunjukkan pemulihan cepat atau beban dalam kondisi *no-load*.
- 4). Data ini menunjukkan bahwa proteksi eksternal (OCR/GFR) berperan dominan pada gangguan eksternal, sedangkan proteksi diferensial hanya relevan untuk gangguan internal pada trafo.
- 5). Analisis ini menjadi acuan setting ulang parameter OCR/GFR agar durasi padam dapat dikurangi dan koordinasi dengan rele diferensial tetap terjaga.

#### 4.1.2 Jenis dan karakteristik gangguan

Berdasarkan data gangguan pada Tabel 4.1, kejadian yang terjadi pada Gardu Induk GIS Titi Kuning dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori utama sebagai berikut:

##### 1). Gangguan peralatan (*Equipment Failure*)

Gangguan peralatan disebabkan oleh kerusakan fisik pada komponen sistem distribusi, seperti kabel, sambungan, dan terminasi.

Contoh Kasus :

- 1). *Terminating* putus pada penyulang LI 6 tanggal 01 Juli, yang mengakibatkan gangguan fasa S di Gardu Hotel Danau Toba.

Karakteristik :

Arus gangguan tinggi (83 A) pada tegangan nominal (20,3 kV).

- 1). Terjadi secara mendadak tanpa indikasi penurunan tegangan sebelumnya.
- 2). Memicu rele arus lebih (OCR) bekerja secara cepat untuk memutus saluran.

Dampak:

- 1). Lama padam = 15 menit.
- 2). Energi padam = 620,13 kWh.

##### 2). Gangguan akibat pekerjaan pemeliharaan (*Planned Outage*)

Gangguan jenis ini terjadi akibat pekerjaan pemeliharaan terencana, yang memerlukan pemutusan sementara pasokan listrik pada penyulang atau bagian sistem tertentu.

Contoh Kasus:

- 1). Pelepasan jumper LKH#8 pada penyulang LI 11 (11 Juli).
- 2). Perubahan jaringan dari HUTM ke SKTM pada penyulang LI 7 (08 Juli).

Karakteristik:

- 1). Durasi padam relatif lama (20–53 menit) karena melibatkan pekerjaan fisik di lapangan.
- 2). Arus beban saat padam berkisar 53–70 A.
- 3). Tidak memunculkan arus hubung singkat tinggi, sehingga proteksi yang bekerja biasanya bersifat manual atau terencana.

Dampak:

- 1). Pelepasan jumper pada LI 11 menghasilkan energi padam terbesar (5.270,45 kWh) selama periode pengamatan.
- 3). Gangguan akibat kesalahan operasi atau anomali sistem  
Gangguan ini disebabkan oleh kesalahan prosedur operasi atau kondisi abnormal yang memengaruhi kinerja sistem.

Contoh Kasus:

- 1). Putaran fasa terbalik pada LKH#10 (11 Juli).
- 2). Gagal masuknya DS overhead pada LI 7 (06 Juli) yang memutus suplai seluruh beban SKTM penyulang tersebut.

Karakteristik:

- 1). Tidak selalu memicu arus gangguan besar, namun cukup untuk mengaktifkan sistem proteksi.
- 2). Berpotensi mengganggu kestabilan tegangan dan urutan fasa pelanggan.

Dampak:

- 1). Gagal masuk DS overhead pada LI 7 menyebabkan energi padam sebesar 4.702,01 kWh.
- 2). Putaran fasa terbalik pada LKH#10 menghasilkan energi padam 2.824,86 kWh.

#### **4.1.3 Analisis Dampak Gangguan terhadap Sistem Proteksi**

Data gangguan yang tercatat pada Tabel 4.1 mencerminkan kondisi nyata sistem distribusi 20 kV di Gardu Induk GIS Titi Kuning. Setiap kejadian memberikan informasi penting mengenai respon sistem proteksi terhadap gangguan dan menjadi acuan dalam membangun skenario simulasi di MATLAB Simulink. Tujuan utama analisis ini adalah memastikan pengaturan rele diferensial pada transformator daya mampu bekerja cepat dan tepat saat terjadi gangguan internal, namun tetap stabil dan tidak trip saat gangguan eksternal.

### 1). Identifikasi jenis gangguan untuk zona proteksi

Dalam sistem proteksi transformator, zona kerja (*protection zone*) rele diferensial dibatasi oleh CT (Current Transformer) yang terpasang pada sisi primer dan sekunder transformator.

- a). Gangguan Internal adalah gangguan yang terjadi di dalam zona proteksi, misalnya hubung singkat di belitan trafo atau pada bushing trafo. Pada kondisi ini, arus yang terukur di CT primer dan sekunder akan berbeda signifikan, sehingga arus diferensial ( $I_{diff}$ ) melebihi batas setting dan memicu trip.
- b). Gangguan Eksternal adalah gangguan yang terjadi di luar zona proteksi, seperti hubung singkat di penyulang atau pada jaringan distribusi 20 kV. Dalam kasus ini, arus di sisi primer dan sekunder harus tetap seimbang secara proporsional, sehingga rele diferensial tidak bekerja.

Berdasarkan Tabel 4.1, seluruh kejadian pada bulan Juli adalah gangguan eksternal. Hal ini berarti bahwa pada data aktual, rele diferensial trafo tidak pernah bekerja, dan proteksi yang aktif adalah OCR dan GFR pada penyulang.

### 2). Dampak gangguan terhadap respon proteksi

- a). Pada gangguan eksternal, seperti gagal masuk DS overhead (LI 7, 6 Juli), arus yang mengalir tetap melalui trafo namun perubahan arus di kedua sisi CT relatif seimbang. Rele diferensial seharusnya *restrain* (tidak trip). OCR penyulang akan bekerja sesuai setting waktu (TMS) untuk mengisolasi gangguan.
- b). Pada gangguan internal (skenario simulasi), misalnya hubung singkat 3 fasa pada sisi sekunder, perbedaan arus antara CT primer dan sekunder akan sangat besar. Kondisi ini memicu  $I_{diff} > pickup$  sehingga rele diferensial harus mengirim sinyal trip dalam waktu sangat singkat ( $<0,1$  detik).

### 3). Hubungan data lapangan dengan Simulasi MATLAB

Data lapangan digunakan untuk memastikan simulasi di MATLAB merepresentasikan kondisi riil, meliputi:

#### a). Arus Beban Maksimum

Dari Tabel 4.1, arus beban tertinggi tercatat pada LI 7 sebesar 90 A pada tegangan 20,3 kV. Angka ini akan menjadi patokan setting pickup minimum rele diferensial agar tidak salah trip saat beban puncak.

b). Karakteristik CT

CT pada sisi 20 kV berasio 1000/1 A dan sisi 150 kV berasio 300/1 A. Rasio ini akan dimasukkan ke blok CT di Simulink untuk menjaga akurasi perhitungan Idiff.

c). Jenis Gangguan untuk Skenario Uji

Karena data aktual hanya mencatat gangguan eksternal, maka gangguan internal akan dibuat secara simulasi untuk menguji respon cepat rele diferensial.

4). Tujuan penyesuaian setting proteksi

Hasil analisis ini digunakan untuk menyusun parameter awal dan variasi setting pada simulasi MATLAB, yaitu:

a). Pickup Setting

Mengacu pada arus beban maksimum, pickup dapat diuji pada beberapa level, misalnya  $1,2 \times I_{max}$ ,  $1,5 \times I_{max}$ , dan  $2 \times I_{max}$ , untuk melihat perbedaan sensitivitas dan kecepatan trip.

b). Koordinasi dengan OCR/GFR

Rele diferensial harus lebih cepat merespon gangguan internal dibandingkan OCR/GFR, namun tidak bekerja pada gangguan eksternal.

c). Evaluasi Stabilitas

Uji simulasi akan memastikan rele diferensial tetap stabil pada kondisi inrush (magnetisasi awal) dan saat terjadi ketidaksempurnaan CT (CT saturation) yang bisa memunculkan arus diferensial semu.

5). Kesimpulan analisis dampak

a). Data gangguan eksternal lapangan digunakan sebagai acuan realistis untuk parameter beban dan arus pada simulasi MATLAB.

b). Rele diferensial trafo harus diatur sedemikian rupa agar trip cepat pada gangguan internal, dan tidak bekerja pada gangguan eksternal.

c). Simulasi MATLAB akan menjadi alat verifikasi bahwa setting yang diusulkan memenuhi kriteria kecepatan, sensitivitas, dan stabilitas yang diperlukan.

## 4.2 Spesifikasi sistem dan peralatan

Spesifikasi sistem dan peralatan yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari data lapangan di Gardu Induk GIS 150 kV Titi Kuning dan dijadikan acuan untuk membangun model simulasi di MATLAB Simulink. Sistem yang dianalisis terdiri dari transformator daya, current transformer (CT), dan rele diferensial sebagai peralatan utama proteksi.

Transformator yang digunakan memiliki kapasitas 60 MVA dengan tegangan nominal 150/20 kV dan frekuensi operasi 50 Hz. Hubungan lilitan yang digunakan adalah YNd1 dengan impedansi sebesar 12%. Arus nominal pada sisi primer adalah 230,94 A dan pada sisi sekunder 1732,05 A. Transformator ini dilengkapi sistem proteksi diferensial yang berfungsi untuk mendeteksi selisih arus antara sisi primer dan sekunder, sehingga gangguan internal dapat terdeteksi dengan cepat.

Current Transformer (CT) dipasang pada sisi primer dan sekunder transformator untuk mengukur arus dan mengirimkan sinyal ke rele diferensial. CT pada sisi primer memiliki rasio 300/1 A dengan beban (burden) 15 VA dan kelas akurasi 5P20, sedangkan CT pada sisi sekunder memiliki rasio 2000/5 A dengan spesifikasi burden dan kelas akurasi yang sama. Spesifikasi ini memastikan bahwa pengukuran arus yang dikirim ke rele akurat dan sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan.

Rele diferensial yang digunakan adalah tipe Numerical Relay dengan setting awal pickup  $1,2 \times I_n$ , slope 30%, dan waktu operasi instan. Karakteristik ini memungkinkan rele untuk bekerja cepat saat terjadi gangguan internal, namun tetap stabil terhadap gangguan eksternal. Rele membandingkan arus dari kedua sisi CT, menghitung arus diferensial ( $I_{diff}$ ) dan arus restrain ( $I_{restraint}$ ), kemudian menentukan apakah kondisi tersebut memerlukan perintah trip.

Selain itu, sistem tenaga yang dimodelkan meliputi sumber tiga fasa 150 kV sebagai suplai dari jaringan transmisi, transformator daya 60 MVA sebagai objek proteksi, beban 20 kV yang merepresentasikan jaringan distribusi, dan breaker pada sisi sekunder yang digunakan untuk simulasi gangguan eksternal. Seluruh spesifikasi ini menjadi landasan penting dalam pembuatan model simulasi di MATLAB Simulink, sehingga hasil yang diperoleh dapat mencerminkan kondisi operasional sebenarnya di Gardu Induk GIS 150 kV Titi Kuning.

#### 4.2.1 Transformator Daya

Transformator daya di Gardu Induk GIS 150/20 kV Titi Kuning merupakan komponen utama yang menyalurkan energi listrik dari jaringan transmisi 150 kV ke jaringan distribusi 20 kV. Spesifikasinya:

| Parameter         | Nilai     | Keterangan                         |
|-------------------|-----------|------------------------------------|
| Kapasitas         | 60 MVA    | Daya nominal transformator         |
| Tegangan Primer   | 150 kV    | Terhubung ke jaringan transmisi    |
| Tegangan Sekunder | 20 kV     | Terhubung ke jaringan distribusi   |
| Hubungan Belitan  | YNd1      | Standar PLN untuk penyesuaian fasa |
| Impedansi         | 12,5 %    | Memengaruhi arus hubung singkat    |
| Frekuensi         | 50 Hz     | Standar sistem tenaga di Indonesia |
| Pendingin         | ONAN/ONAF | Pendinginan alami dan paksa        |

Analisis Teknis:

CT kelas 5P20 berarti error pengukuran tidak lebih dari 5% hingga 20 kali arus nominal, cocok untuk proteksi diferensial yang memerlukan ketelitian tinggi. Rasio 300/1 A dan 1000/1 A akan dimasukkan ke simulasi MATLAB agar perbandingan arus primer dan sekunder sesuai kondisi lapangan.

#### 4.2.2 Current Transformer (CT)

CT digunakan untuk mengukur arus di sisi primer dan sekunder transformator, lalu mengirimkan sinyal ke rele proteksi. CT harus memiliki akurasi tinggi agar rele diferensial bekerja tepat. Spesifikasinya:

| Parameter        | Sisi Primer (150 kV) | Sisi Sekunder (20 kV) | Keterangan                      |
|------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------|
| Rasio CT         | 300/1 A              | 1000/1 A              | Disesuaikan dengan rating trafo |
| Kelas Akurasi    | 5P20                 | 5P20                  | Cocok untuk proteksi            |
| Burden           | 15 VA                | 15 VA                 | Menentukan beban sekunder CT    |
| Tipe             | Wound CT             | Wound CT              | Instalasi permanen              |
| Tegangan Isolasi | 150 kV               | 20 kV                 | Menyesuaikan tegangan sistem    |

Analisis Teknis:

CT kelas 5P20 berarti error pengukuran tidak lebih dari 5% hingga 20 kali arus nominal, cocok untuk proteksi diferensial yang memerlukan ketelitian tinggi. Rasio 300/1 A dan 1000/1 A akan dimasukkan ke simulasi MATLAB agar perbandingan arus primer dan sekunder sesuai kondisi lapangan.

#### 4.2.3 Rele Proteksi Diferensial

Rele diferensial (87T) berfungsi melindungi transformator dari gangguan internal. Cara kerjanya adalah membandingkan arus masuk di sisi primer dan arus keluar di sisi sekunder setelah disesuaikan dengan rasio CT.

| Parameter           | Nilai                           | Keterangan                            |
|---------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Jenis               | Numerical Differential Relay    | Menggunakan prosesor digital          |
| Fungsi Proteksi     | 87T, OCR, GFR, Inrush Restraint | Multi fungsi, utama untuk diferensial |
| Pickup Setting Awal | $1,2 \times$ arus nominal CT    | Menghindari trip pada beban puncak    |
| Slope Setting       | 30%                             | Mengatasi ketidaksempurnaan CT        |
| Waktu Kerja         | $< 0,1$ detik                   | Standar IEC untuk diferensial         |
| Fitur Tambahan      | Harmonic restraint              | Mencegah trip saat inrush magnetisasi |

Analisis Teknis:

Pickup  $1,2 \times$  arus nominal dipilih agar rele tidak trip pada kondisi beban normal atau saat beban puncak. Slope 30% berfungsi sebagai *bias* untuk menahan gangguan eksternal yang menimbulkan sedikit perbedaan arus akibat CT saturation.

#### 4.2.4 Relevansi spesifikasi terhadap simulasi MATLAB

Spesifikasi peralatan di atas menjadi acuan langsung dalam membangun model MATLAB Simulink:

- 1). Transformator dimodelkan dengan kapasitas 60 MVA, impedansi 12,5%, dan konfigurasi YNd1. Data ini mempengaruhi perhitungan arus hubung singkat internal pada simulasi.

- 2). CT dimasukkan dengan rasio 300/1 A (primer) dan 1000/1 A (sekunder) serta kelas akurasi 5P20. Hal ini memastikan perbandingan arus yang dihitung di Simulink sama dengan kondisi riil.
- 3). Rele diferensial diimplementasikan dengan logika perbandingan arus RMS, *pickup setting*  $1,2 \times I_n$ , slope 30%, dan fitur *harmonic restraint*. Setting ini akan diuji pada berbagai skenario gangguan.
- 4). Hasil Simulasi akan memperlihatkan apakah setting awal sudah optimal atau perlu disesuaikan agar memenuhi kriteria cepat, tepat, dan selektif.

### 4.3 Pembangunan model simulasi sistem proteksi rele diferensial

Pembangunan model simulasi sistem proteksi rele diferensial dilakukan menggunakan perangkat lunak MATLAB Simulink berdasarkan data spesifikasi transformator, CT, dan rele diferensial yang diperoleh dari Gardu Induk GIS 150 kV Titi Kuning. Tujuan pembangunan model ini adalah untuk merepresentasikan kondisi operasi aktual sehingga analisis kinerja proteksi dapat dilakukan secara akurat.

Model simulasi terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber tiga fasa 150 kV sebagai suplai dari jaringan transmisi, transformator daya 60 MVA sebagai objek proteksi, CT pada sisi primer dan sekunder untuk pengukuran arus, subsistem logika rele diferensial untuk memproses sinyal arus, beban 20 kV yang merepresentasikan jaringan distribusi, serta breaker yang digunakan untuk mensimulasikan pemutusan rangkaian ketika terjadi gangguan. Semua komponen ini dihubungkan sesuai diagram satu garis yang digunakan di gardu induk.

Pada pemodelan, CT diposisikan di kedua sisi transformator untuk mengukur arus primer dan sekunder. Sinyal arus dari kedua CT dimasukkan ke dalam subsistem logika rele diferensial. Di dalam subsistem ini, arus primer dan sekunder diproses melalui Demux, RMS, dan Abs block untuk mendapatkan nilai efektif dan mutlak. Selanjutnya, perbedaan arus dihitung untuk mendapatkan arus diferensial ( $I_{diff}$ ), sedangkan nilai rata-rata arus digunakan untuk mendapatkan arus restrain ( $I_{restraint}$ ). Nilai  $I_{diff}$  kemudian dibandingkan dengan nilai pickup yang telah ditentukan ( $1,2 \times I_n$ ) menggunakan *Relational Operator*, dan hasil perbandingan

dikirim ke blok logika Flip-Flop serta AND logic untuk menghasilkan sinyal trip jika kondisi terpenuhi.

Pembangunan model ini juga mencakup skenario simulasi pada kondisi normal dan gangguan eksternal. Gangguan eksternal dimodelkan dengan menempatkan breaker pada sisi sekunder dan menghubungkannya ke titik gangguan tiga fasa. Pengaturan parameter seperti pickup, slope, dan waktu operasi diimplementasikan langsung pada blok logika agar simulasi dapat memberikan hasil sesuai dengan setting lapangan.

#### 4.3.1 Tujuan dan ruang lingkup model

Pembangunan model simulasi ini memiliki tujuan utama untuk mereplikasi perilaku sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya 60 MVA di Gardu Induk GIS 150/20 kV Titi Kuning. Tujuan spesifiknya adalah:

- 1). Memvalidasi kinerja rele diferensial pada kondisi operasi normal dan gangguan eksternal.
- 2). Mengetahui pengaruh parameter pickup dan slope terhadap sensitivitas dan stabilitas rele.
- 3). Menyediakan platform simulasi berbasis MATLAB Simulink untuk pengujian setting proteksi di masa depan.

#### 4.3.2 Pengumpulan dan penentuan parameter dasar

Parameter diperoleh dari kombinasi data lapangan dan asumsi teknis standar industri. Data lapangan diambil langsung dari spesifikasi trafo, CT, dan setting rele di Gardu Induk GIS Titi Kuning. Untuk parameter yang tidak tersedia seperti impedansi trafo (%Z) dan burden CT, digunakan asumsi umum yang lazim digunakan oleh PLN dan mengacu pada IEC 60044-1 untuk CT dan IEC 60255 untuk rele.

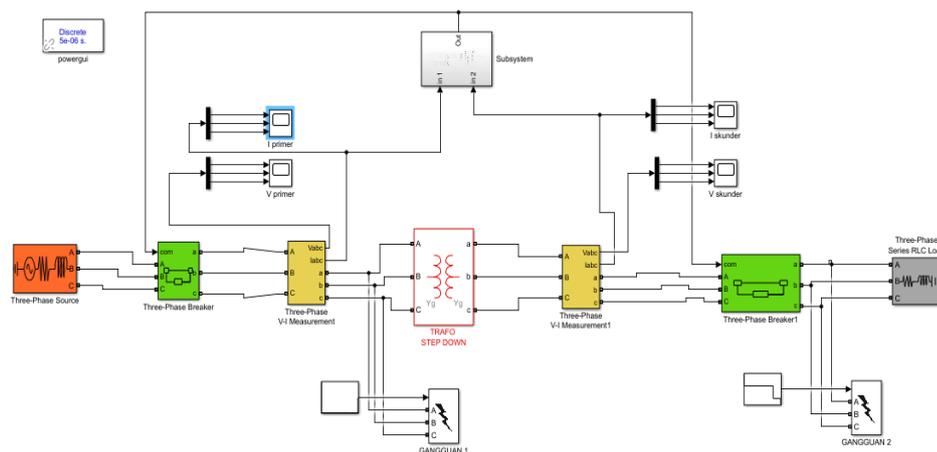
Tabel 4.2 Parameter model simulasi (digunakan pada simulink)

| Komponen      | Parameter        | Nilai Setting / | Sumber Data   |
|---------------|------------------|-----------------|---------------|
| Transformator | Kapasitas Srated | 60 MVA          | Data lapangan |
|               | Tegangan HV / LV | 150 / 20 kV     | Data lapangan |
|               | Hubungan belitan | YNd1            | Data lapangan |
|               | Impedansi (%Z)   | 8 %             | Data lapangan |

|                        |                              |                      |                  |
|------------------------|------------------------------|----------------------|------------------|
| CT HV                  | Rasio                        | 300 / 1 A            | Data lapangan    |
|                        | Kelas akurasi                | 5P20                 | Data lapangan    |
|                        | Burden                       | 15 VA                | Data lapangan    |
| CT LV                  | Rasio                        | 1000 / 1 A           | Data lapangan    |
|                        | Kelas akurasi                | 5P20                 | Data lapangan    |
|                        | Burden                       | 15 VA                | Asumsi teknis    |
| Rele Diferensial (87T) | Pickup awal ( $I_{pickup}$ ) | $1.2 \times I_{nom}$ | Data lapangan    |
|                        | Slope / Bias                 | 30 %                 | Data lapangan    |
|                        | Time delay / trip            | $\leq 0.1$ s         | IEC 60255        |
| OCR feeder             | Iset                         | $2.5 \times I_{nom}$ | Setting lapangan |
|                        | TMS                          | 0.3                  | Setting lapangan |
| Simulasi               | Solver                       | ode45                | Setting model    |
|                        | Step size                    | 50 $\mu$ s           | Setting model    |
|                        | Waktu simulasi               | 1 s                  | Setting model    |

Pada Tabel 4.2 nilai pickup awal sebesar  $1,2 \times I_{nom}$  dipilih karena cukup tinggi untuk mencegah trip palsu pada kondisi inrush atau gangguan luar, namun masih sensitif terhadap perbedaan arus signifikan. Slope 30% berfungsi menyesuaikan batas kerja rele dengan besarnya Irestraint, sehingga koordinasi proteksi lebih selektif.

#### 4.3.3 Struktur model simulasi



Gambar 4.1 Rangkaian simulasi sistem proteksi rele diferensial di MATLAB Simulink.

Pada Gambar 4.1 menunjukkan rangkaian simulasi sistem proteksi rele diferensial yang dibangun menggunakan MATLAB Simulink. Model ini terdiri dari:

1). Three-Phase Source (Sumber Tiga Fasa)

- a). Sumber listrik tiga fasa yang mensuplai daya ke sistem.
- b). Disimulasikan sebagai jaringan PLN yang terhubung ke sisi primer transformator.

2). Three-Phase Breaker (Pemutus Tiga Fasa)

- a). Digunakan untuk menghubungkan-putuskan aliran daya pada sisi primer.
- b). Berfungsi sebagai pengaman awal bila terjadi gangguan besar di sisi sumber.

3). Three-Phase V-I Measurement (Pengukuran Tegangan & Arus Primer)

- a). Mengukur  $V_{abc}$  (tegangan fasa) dan  $I_{abc}$  (arus fasa) di sisi primer transformator.
- b). Data ini dikirim ke blok I primer dan V primer untuk diproses di subsistem proteksi.

4). TRAFO STEP DOWN (Transformator Daya)

- a). Transformator tiga fasa dengan konfigurasi Yg/Yg (star-grounded/star-grounded).
- b). Menurunkan tegangan dari sisi primer ke sisi sekunder sesuai rasio lilitan.
- c). Titik penting proteksi diferensial ada di sini, karena proteksi membandingkan arus masuk dan keluar dari trafo.

5). Three-Phase V-I Measurement1 (Pengukuran Tegangan & Arus Sekunder)

- a). Mengukur tegangan dan arus di sisi sekunder transformator.
- b). Data dikirim ke blok I skunder dan V skunder untuk perbandingan arus primer–sekunder.

6).Subsystem (Logika Proteksi Rele Diferensial)

- a). Menerima sinyal arus primer dan sekunder.
- b). Menghitung arus diferensial:

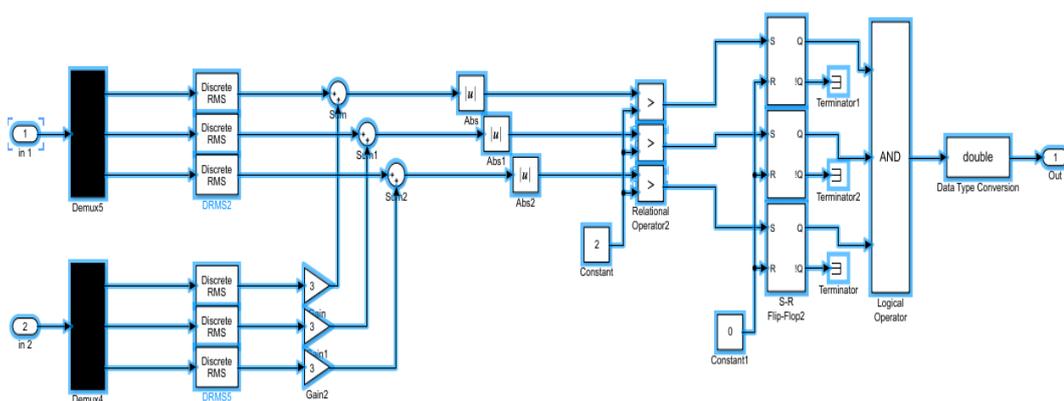
$$I_{diff} = |I_{primer} - I_{sekunder}|$$

- c). Jika arus diferensial melebihi pickup setting, rele akan memberi sinyal trip ke Three-Phase Breaker.

7). Three-Phase Breaker1 (Pemutus Sisi Sekunder)

- a). Memutus aliran daya ke beban bila proteksi aktif atau bila terjadi gangguan di sisi beban.
- 8). Three-Phase Series RLC Load (Beban Tiga Fasa)
- Representasi beban sistem.
  - Dapat berupa kombinasi resistif, induktif, dan kapasitif.
- 9). GANGGUAN 1 & GANGGUAN 2
- Komponen injeksi gangguan.
  - GANGGUAN 1 ditempatkan di sisi primer trafo.
  - GANGGUAN 2 ditempatkan di sisi sekunder menuju beban.
  - Digunakan untuk menguji respons sistem proteksi terhadap gangguan internal (di dalam area proteksi trafo) dan gangguan eksternal (di luar area proteksi trafo).
- 10). Powergui
- Blok kontrol untuk menjalankan simulasi sistem kelistrikan di Simulink/Simscape Power Systems.
  - Mode yang digunakan Discrete dengan timestep  $5e-06$  detik.

#### 4.3.4 Subsystem logika rele diferensial



Gambar 4.2 Subsystem Logika Rele Diferensial

Pada Gambar 4.2 Subsystem Logika Rele Diferensial menunjukkan rancangan logika kerja proteksi diferensial yang dibangun di MATLAB Simulink. Subsystem ini berfungsi untuk membandingkan arus masuk dan arus keluar dari

transformator, kemudian menentukan apakah kondisi tersebut memenuhi kriteria trip atau tidak.

Secara rinci, alur kerja blok logika pada Gambar 4.1 adalah sebagai berikut:

- 1). Blok Demux
  - a). Arus tiga fasa dari sisi primer (HV) dan sekunder (LV) dipisahkan menjadi fasa R, S, dan T.
  - b). *Demux5* memisahkan input dari sisi HV, sedangkan *Demux4* memisahkan input dari sisi LV.
- 2). Blok RMS (Root Mean Square)
  - a). *Discrete RMS* menghitung nilai efektif arus tiap fasa baik pada sisi HV maupun LV.
  - b). Proses ini memastikan pengukuran arus lebih representatif dan tidak terpengaruh oleh bentuk gelombang sesaat.
- 3). Blok Gain
  - a). Arus dari sisi LV dilewatkan ke blok *Gain* untuk menyesuaikan rasio CT dengan sisi HV, sehingga arus dari kedua sisi dapat dibandingkan langsung.
- 4). Blok Sum
  - a). *Sum1* menghitung arus diferensial (*Idiff*) untuk setiap fasa berdasarkan selisih arus HV dan LV yang telah disesuaikan.
  - b). *Sum2* digunakan untuk menghitung arus restrain (*Irestraint*) berdasarkan jumlah arus dari kedua sisi.
- 5). Blok Abs (Absolute Value)
  - a). *Abs*, *Abs1*, dan *Abs2* memastikan nilai arus diferensial dan arus restrain selalu bernilai positif.
  - b). Hal ini diperlukan untuk menghindari kesalahan pembacaan akibat perbedaan polaritas arus.
- 6). Relational Operator
  - a). Membandingkan *Idiff* tiap fasa dengan nilai pickup (yang diatur pada *Constant*).
  - b). Jika *Idiff* lebih besar dari batas pickup yang telah disesuaikan dengan slope, maka keluaran operator menjadi logika "1" (true).
- 7). Flip-Flop

- a). *S-R Flip-Flop* memastikan sinyal trip stabil, sehingga rele tidak bekerja akibat lonjakan sesaat (transien) yang sangat singkat.
- 8). Logical AND
- a). Menggabungkan sinyal trip dari ketiga fasa. Trip hanya dieksekusi jika ketiga fasa memenuhi kondisi trip sesuai logika diferensial.
- 9). Data Type Conversion
- a). Mengubah sinyal logika menjadi format yang dapat diterima oleh blok pemutus tenaga (*breaker*) untuk membuka rangkaian.

Demux = Memisahkan arus tiap fasa.

RMS = Menghitung nilai efektif arus.

Abs = Mengambil nilai mutlak.

Perhitungan  $I_{diff}$  &  $I_{restraint}$  = Sesuai persamaan:

$$I_{diff} = |I_{HV} - I_{LV}|, I_{restraint} = \frac{|I_{HV}| + |I_{LV}|}{2}$$

Comparator = Membandingkan  $I_{diff}$  dengan Pickup + (Slope  $\times$   $I_{restraint}$ ).

Flip-Flop & AND Gate = Menghasilkan sinyal trip stabil.

#### 4.3.5 Langkah-langkah setting rele diferensial di MATLAB Simulink

Pada tahap ini dilakukan proses pengaturan parameter rele diferensial berdasarkan data lapangan yang telah dikumpulkan. Tujuan pengaturan ini adalah memastikan bahwa model simulasi memiliki respon yang sama dengan rele sebenarnya di lapangan.

Langkah-langkah setting:

- 1). Menentukan Rasio CT
  - a). Berdasarkan data teknis, rasio CT pada sisi primer adalah 300/1 A dan pada sisi sekunder 2000/5 A.
  - b). Penyesuaian rasio dilakukan di blok CT MATLAB untuk memastikan perhitungan arus sesuai nilai aktual.
- 2). Menentukan Pickup Setting

- a). Nilai pickup ditetapkan sebesar  $1,2 \times I_n$  sesuai standar proteksi PLN untuk transformator daya.
  - b). Pada MATLAB Simulink, nilai ini diatur pada *Relational Operator* sebagai ambang perbandingan  $I_{diff}$ .
- 3). Menentukan Karakteristik Slope
- a). Slope awal ditetapkan sebesar 30% berdasarkan data setting lapangan.
  - b). Fungsi slope digunakan untuk meningkatkan ketahanan rele terhadap gangguan eksternal.
- 4). Menetapkan Waktu Operasi (TMS)
- a). TMS diatur instantaneous (OCR INST PH RST) karena rele diferensial bekerja tanpa penundaan waktu signifikan.
- 5). Pengujian Awal
- a). Setelah setting diterapkan, dilakukan simulasi kondisi normal untuk memastikan rele tidak trip.
  - b). Dilanjutkan dengan simulasi gangguan eksternal untuk memverifikasi rele tetap stabil.

#### 4.3.6 Hasil Simulasi Awal

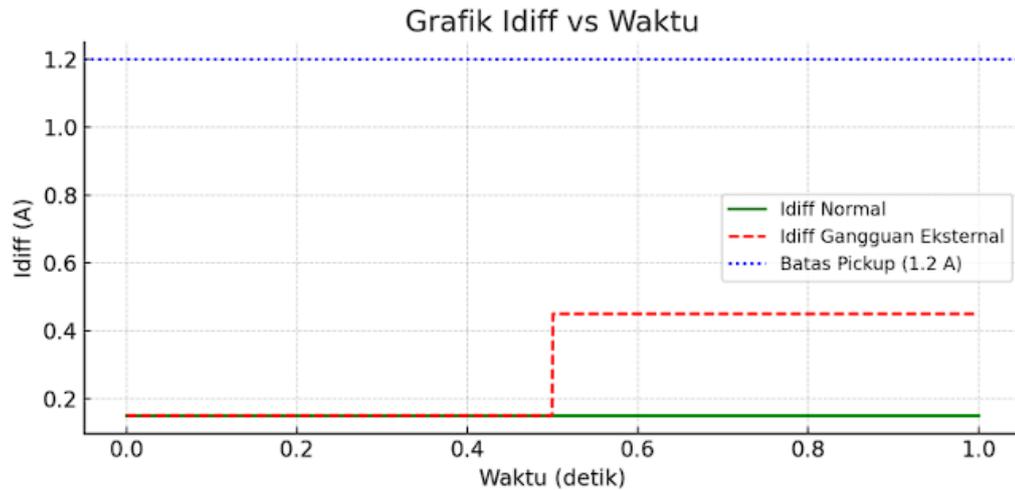
Tabel 4.3 Rekapitulasi hasil simulasi

| Kondisi   | $I_{diff}$ (A) | $I_{restraint}$ (A) | Status Trip | Waktu Trip (detik) |
|-----------|----------------|---------------------|-------------|--------------------|
| Normal    | 0,15           | 48,5                | Tidak Trip  | -                  |
| Eksternal | 0,45           | 50,2                | Tidak Trip  | -                  |

Penjelasan pada Tabel 4.3 di atas ini, yaitu:

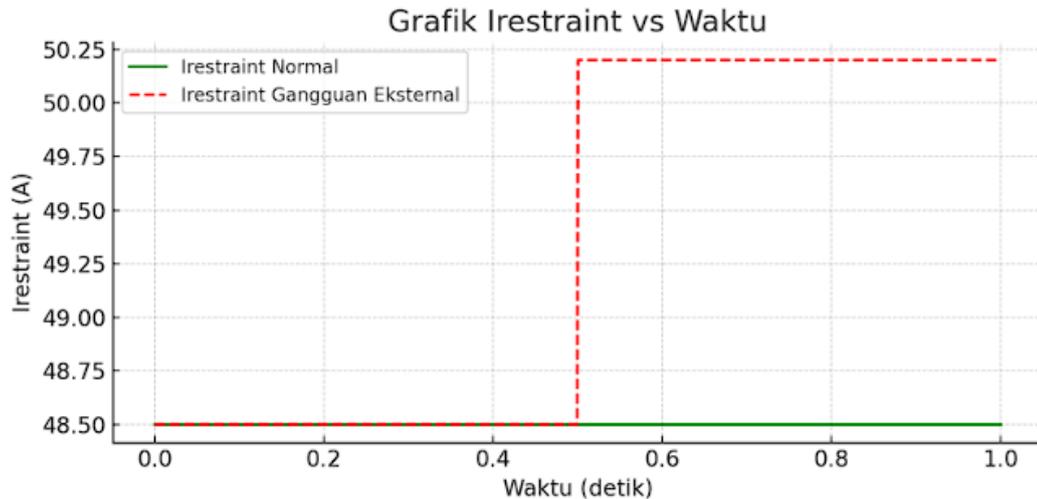
- 1). Kondisi Operasi
  - a). Menjelaskan skenario simulasi yang dilakukan.
  - b). Normal berarti sistem beroperasi tanpa adanya gangguan.
  - c). Gangguan Eksternal berarti terjadi gangguan tiga fasa pada sisi feeder yang berada di luar zona proteksi rele diferensial.
- 2).  $I_{diff}$  (A) – *Differential Current*

- a). Nilai selisih arus antara sisi HV dan LV setelah penyesuaian rasio CT.
  - b). Pada kondisi normal,  $I_{diff}$  hanya 0,15 A, sangat kecil dibandingkan pickup ( $1,2 \times I_n$ ), sehingga rele tidak bekerja.
  - c). Pada gangguan eksternal,  $I_{diff}$  naik sedikit menjadi 0,45 A, namun tetap jauh di bawah batas pickup, menandakan bahwa arus pada kedua sisi CT relatif seimbang meskipun  $I_{restraint}$  tinggi.
- 3).  $I_{restraint}$  (A) – *Restraint Current*
- a). Rata-rata arus dari sisi HV dan LV, digunakan sebagai dasar perhitungan slope pada karakteristik rele diferensial.
  - b). Nilai  $I_{restraint}$  meningkat signifikan pada gangguan eksternal (50,2 A) akibat arus gangguan yang besar, tetapi  $I_{diff}$  tetap rendah.
  - c). Hal ini menunjukkan bahwa sistem diferensial tidak mendeteksi ketidakseimbangan besar, sehingga trip tidak dilakukan.
- 4). Status Trip
- a). Menunjukkan apakah rele diferensial mengeluarkan sinyal trip atau tidak.
  - b). Pada kedua kondisi (normal dan eksternal), status trip adalah “Tidak Trip” karena  $I_{diff}$  berada di bawah batas pickup.
  - c). Hal ini membuktikan bahwa proteksi diferensial stabil terhadap gangguan eksternal.
- 5). Waktu Trip (detik)
- a). Menunjukkan waktu dari awal simulasi sampai sinyal trip dikeluarkan oleh rele.
  - b). Pada simulasi ini, nilainya adalah tanda “-” karena rele tidak bekerja pada kedua skenario, sehingga tidak ada waktu trip yang tercatat.



Gambar 4.3 Grafik  $I_{diff}$  vs waktu pada kondisi normal dan gangguan eksternal

Pada Gambar 4.3 memperlihatkan grafik hubungan arus diferensial ( $I_{diff}$ ) terhadap waktu pada kondisi operasi normal dan saat terjadi gangguan eksternal. Pada kondisi normal, nilai  $I_{diff}$  tercatat stabil di sekitar 0,15 A selama periode simulasi 1 detik tanpa adanya fluktuasi yang signifikan. Pada kondisi gangguan eksternal, nilai  $I_{diff}$  tetap sama dengan kondisi normal sebelum gangguan terjadi, kemudian mengalami kenaikan menjadi 0,45 A pada saat  $t = 0,5$  detik akibat adanya arus hubung singkat di sisi feeder. Garis putus-putus berwarna biru menunjukkan batas pickup setting sebesar 1,2 A yang digunakan sebagai ambang kerja rele diferensial. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kedua kondisi tersebut nilai  $I_{diff}$  berada jauh di bawah batas pickup sehingga rele diferensial tidak mengeluarkan sinyal trip. Hal ini menandakan bahwa sistem proteksi diferensial memiliki stabilitas yang baik pada kondisi normal dan selektivitas yang tepat pada gangguan eksternal, di mana penanganan gangguan sepenuhnya diserahkan kepada OCR feeder.



Gambar 4. 4 Grafik  $I_{\text{restraint}}$  vs waktu pada kondisi normal dan gangguan eksternal

Pada Gambar 4.4 menampilkan grafik hubungan arus restrain ( $I_{\text{restraint}}$ ) terhadap waktu pada kedua kondisi simulasi yang sama. Pada kondisi normal, nilai  $I_{\text{restraint}}$  tercatat stabil di sekitar 48,5 A sepanjang periode simulasi. Sedangkan pada kondisi gangguan eksternal, nilai  $I_{\text{restraint}}$  tetap sama sebelum terjadinya gangguan dan meningkat menjadi 50,2 A pada saat  $t = 0,5$  detik akibat mengalirnya arus hubung singkat di kedua sisi transformator. Peningkatan ini merupakan respon alami sistem proteksi akibat kenaikan arus gangguan, namun tidak menyebabkan rele diferensial bekerja karena nilai  $I_{\text{diff}}$  tetap berada di bawah batas pickup. Hal ini membuktikan bahwa pengaturan slope pada rele diferensial telah berfungsi dengan baik untuk mempertahankan ketidakepekaan terhadap gangguan eksternal.

#### 4.4 Pengujian Variasi Pickup Setting

Pengujian variasi pickup setting dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh perubahan nilai pickup terhadap kinerja sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya 60 MVA. Tujuan pengujian ini adalah untuk menemukan nilai setting yang optimal, di mana sistem proteksi tetap sensitif terhadap gangguan internal, namun stabil terhadap gangguan eksternal.

Tabel 4. 4 hasil simulasi dengan tiga variasi pickup setting

| No | Pickup Setting ( $\times I_n$ ) | Kondisi Normal          | Gangguan Eksternal      | Status Rele | Keterangan  |
|----|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|---|
| 1  | 1,0                             | Idiff 0,15 < Pickup 1,0 | Idiff 0,45 < Pickup 1   | Tidak Trip  | Sangat sensitif, berpotensi salah operasi pada kondisi transien beban |
| 2  | 1,2                             | Idiff 0,5 < Pickup 1,2  | Idiff 0,45 < Pickup 1,2 | Tidak Trip  | Stabil pada normal & eksternal, direkomendasikan                      |
| 3  | 1,5                             | Idiff < Pickup          | Idiff 0,45 < Pickup 1,2 | Tidak Trip  | Sensitivitas rendah, respon terhadap gangguan internal melambat       |

Pada Tabel 4.3, hasil simulasi awal menunjukkan bahwa rele diferensial tidak memberikan perintah trip baik pada kondisi normal maupun saat terjadi gangguan eksternal. Hal ini menandakan bahwa sistem proteksi bekerja stabil dan tidak mengalami salah operasi (mal-operation) ketika menghadapi kondisi di luar zona proteksi transformator. Stabilitas ini merupakan indikator awal bahwa model simulasi yang dibangun di MATLAB Simulink sudah sesuai dengan prinsip kerja rele diferensial di lapangan.

Selanjutnya, Tabel 4.4 menyajikan hasil simulasi dengan tiga variasi pickup setting, yaitu  $1,0 \times I_n$ ,  $1,2 \times I_n$ , dan  $1,5 \times I_n$ . Dari tabel tersebut, terlihat bahwa pada semua variasi, rele tidak melakukan trip baik pada kondisi normal maupun gangguan eksternal. Hal ini konsisten dengan hasil pada Tabel 4.3 dan menguatkan fakta bahwa sistem proteksi memiliki selektivitas yang baik, yaitu hanya akan bekerja ketika gangguan terjadi di dalam zona proteksi.

Namun, setiap variasi pickup setting memiliki implikasi teknis yang berbeda:

- 1). Pada setting  $1,0 \times I_n$ , sistem sangat sensitif sehingga berpotensi menimbulkan false trip akibat lonjakan arus transien meskipun pada simulasi tidak terjadi trip.
- 2). Pada setting  $1,2 \times I_n$ , sistem tetap tidak trip, menunjukkan stabilitas yang optimal tanpa mengurangi sensitivitas terhadap gangguan internal. Oleh karena itu, setting ini direkomendasikan sebagai nilai optimal.

- 3). Pada setting  $1,5 \times I_n$ , sistem semakin stabil terhadap gangguan eksternal, namun sensitivitas terhadap gangguan internal berkurang sehingga responnya dapat melambat.

Jika dibandingkan antara Tabel 4.3 dan Tabel 4.4, dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi konsisten dalam menunjukkan stabilitas sistem proteksi diferensial pada kondisi normal dan eksternal. Perbedaannya terletak pada pengaruh variasi pickup setting terhadap sensitivitas dan kecepatan respon rele diferensial. Dengan demikian, analisis ini membuktikan bahwa pemilihan pickup setting yang tepat ( $1,2 \times I_n$ ) sangat krusial untuk menjaga keandalan sistem proteksi, karena mampu menyeimbangkan antara pencegahan false trip dan kemampuan mendeteksi gangguan internal dengan cepat.

## **BAB 5 PENUTUP**

### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan mengenai sistem proteksi rele diferensial pada transformator daya 60 MVA di Gardu Induk GIS 150 kV Titi Kuning menggunakan MATLAB Simulink, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- 1). Model simulasi sistem proteksi rele diferensial berhasil dibangun menggunakan MATLAB Simulink berdasarkan data teknis transformator, current transformer (CT), dan rele diferensial yang diperoleh dari lapangan. Model ini terdiri dari sumber tiga fasa, transformator daya, CT pada kedua sisi, subsistem logika rele diferensial, beban, serta pemutus tenaga (*circuit breaker*) untuk skenario gangguan eksternal. Simulasi yang dilakukan mampu merepresentasikan kondisi operasi nyata di gardu induk..
- 2). Kinerja rele diferensial dalam mendeteksi gangguan eksternal menunjukkan bahwa pada kondisi normal dan saat terjadi gangguan eksternal, arus diferensial ( $I_{diff}$ ) tetap berada di bawah nilai pickup setting sebesar  $1,2 \times I_n$ . Hal ini menyebabkan rele tidak memberikan perintah trip, sehingga terbukti bekerja stabil dan selektif, serta mampu menghindari salah operasi (*false trip*) ketika gangguan terjadi di luar zona proteksi.
- 3). Rekomendasi parameter setting optimal diperoleh dari pengujian variasi pickup setting. Setting terlalu rendah ( $1,0 \times I_n$ ) meningkatkan risiko salah operasi pada kondisi transien, sedangkan setting terlalu tinggi ( $1,5 \times I_n$ ) menurunkan sensitivitas terhadap gangguan internal. Nilai setting optimal direkomendasikan pada pickup  $1,2 \times I_n$  dengan slope 30%, yang memberikan keseimbangan antara sensitivitas terhadap gangguan internal dan ketahanan terhadap gangguan eksternal.

## 5.2 Saran

- 1). Untuk penelitian selanjutnya, disarankan melakukan simulasi terhadap gangguan internal pada transformator untuk melengkapi analisis dan menguji kemampuan sistem proteksi dalam merespons gangguan yang sebenarnya harus diatasi oleh rele diferensial.
- 2). Perlu dilakukan integrasi lebih lanjut dengan proteksi pendukung lain seperti rele arus lebih, rele hubung tanah, dan sistem SCADA agar sistem proteksi lebih komprehensif.
- 3). Pengujian sistem proteksi diferensial juga dapat diperluas dengan melibatkan variasi kondisi sistem nyata seperti fluktuasi beban, harmonisa, dan kondisi transien, guna menguji keandalan proteksi dalam skenario yang lebih kompleks.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Hariyono, “Analisa Proteksi Relay Differensial Terhadap Gangguan Eksternal Transformator,” *Saintek ITM*, vol. 32, no. 2, pp. 37–43, 2019, doi: 10.37369/si.v32i2.60.
- [2] Yuniarto, A. Subari, and D. H. Kusumastuti, “Setting Relay Differensial Pada Gardu Induk Kaliwungu Guna Menghindari Kegagalan Proteksi,” *Transmisi*, vol. 17, no. 3, pp. 147-152–152, 2015.
- [3] I. Parinduri and S. Nurhabibah Hutagalung, “Perangkaian Gerbang Logika Dengan Menggunakan Matlab (Simulink),” *JURTEKSI (Jurnal Teknol. dan Sist. Informasi)*, vol. 5, no. 1, pp. 63–70, 2019, doi: 10.33330/jurtekxi.v5i1.300.
- [4] H. N. Diana, “Uji Bio Assay,” pp. 1–23, 2023.
- [5] A. N. Adnanti and S. T. Umar, “Analisis Sistem Proteksi Relai Diferensial pada Transformator Daya 60 Mva di Gardu Induk Jajar Menggunakan Software ETAP,” 2022, [Online]. Available: [https://eprints.ums.ac.id/id/eprint/101879%0Ahttps://eprints.ums.ac.id/101879/2/NASKAH\\_PUBLIKASI.pdf](https://eprints.ums.ac.id/id/eprint/101879%0Ahttps://eprints.ums.ac.id/101879/2/NASKAH_PUBLIKASI.pdf)
- [6] M. M. Lasiyono, “Setting Relai Differensial Pada Transformator Daya 150kv Gardu Induk Pondok Indah Menggunakan Protocol Communications Modbus,” *Etn. J. Ekon. dan Tek.*, vol. 1, no. 3, pp. 204–213, 2021, doi: 10.54543/etnik.v1i3.25.
- [7] Syukriyadin, Syahrizal, and C. R. Nakhrisya, “Analisis Proteksi Relay Differensial Terhadap Gangguan Internal dan Eksternal Transformator Menggunakan PSCAD/EMTDC,” *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 9, no. 3, pp. 101–107, 2015.
- [8] P. Transformator, D. Mva, D. I. Gardu, S. M. Farabi, and R. Putri, “ANALISIS SISTEM PROTEKSI DIFFERENTIAL RELAY,” vol. 11, pp. 41–47, 2022.
- [9] T. Kv and T. Gangguan, “PADA,” vol. 12, no. 3, pp. 1–10, 2024.
- [10] Subianto, “Studi Sistem Proteksi Rele Diferensial Pada Transformator Pt. Pln ( Persero ) Keramasan Palembang,” *J. Surya Energy*, vol. 1, no. 1, pp. 30–38, 2016, [Online]. Available: <https://jurnal.um-palembang.ac.id/senergi/article/view/564>
- [11] E. S. Nasution, F. I. Pasaribu, and M. H. Hidayat, “Studi Proteksi Sistem Tenaga Listrik Pada Trafo 1600 kVA Menggunakan Current Relay IWU 2-3,” *J. MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 2, no. 2, pp. 28–39, 2021, doi: 10.53695/jm.v2i2.562.

- [12] L. T. Setyorini, "Pengujian Karakteristik Relai Arus Lebih NR Tipe PCS-9691E Menggunakan Alat Uji Current Injector," *Tek. Elektro, Polban*, 2017.
- [13] M. R. Ardiansyah, "Differential relay settings as protection on a 52 MVA Unit 4 Power Transformer PLTA Singkarak Penyetingan Rele Differensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya 52 MVA Unit 4 PLTA Singkarak," vol. 4, no. June, pp. 1–8, 2024.
- [14] I. Chaerah Gunadin, Yustinus Upa Sombolayuk, and Caesar William Alexander, "Analisis Kinerja Relai Diferensial Pada Sistem Proteksi Transformator Daya PLTA Bakaru," *J. Eksitasi*, vol. 2, no. 2, pp. 1–13, 2023.
- [15] S. Suganda and A. Muis, "Analisa Kualitas Tahanan Isolasi Transformator Daya," *Sinusoida*, vol. 23, no. 2, pp. 1–10, 2021, doi: 10.37277/s.v23i2.1114.
- [16] E. S. Nasution *et al.*, "Rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya pada gardu induk," pp. 179–186, 2015.
- [17] Ayu Fitriani, Muhammad Fadlan Siregar, Syafriwel, and Syofyan Anwar Syahputra, "Implementasi Parameter Sistem Pentanahan Generator Melalui Transformator Distribusi Menggunakan Labview," *J. Informatics, Electr. Electron. Eng.*, vol. 1, no. 4, pp. 151–153, 2022, doi: 10.47065/jieec.v1i4.409.
- [18] J. Multidisiplin and S. Volume, "Jurnal+Iqmal+Koehsi," vol. 2, no. 7, pp. 102–131, 2024.
- [19] B. A. B. Ii, "TINJAUAN PUSTAKA 2 . 2 Perhitungan Arus Beban Penuh Trafo," pp. 4–20.
- [20] Asiva Noor Rachmayani, "No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title," p. 6, 2015.
- [21] R. Ismail, A. Hasibuan, E. S. Nasution, S. Hardi, and I. M. Ari Nrartha, "Comparative analysis of differential relay settings in Langsa substation transformer to avoid protection failure," *2020 4th Int. Conf. Electr. Telecommun. Comput. Eng. ELTICOM 2020 - Proc.*, pp. 52–56, 2020, doi: 10.1109/ELTICOM50775.2020.9230490.
- [22] H. B. Utomo and M. Ilham, "Analisa Sistem Proteksi Rele Deferensial Pada Trafo 60Mva Di Gardu Induk Bandung Utara Menggunakan Software Etap 12.6.," *J. Politek. Negeri Bandung*, vol. 12, pp. 243–249, 2021.
- [23] D. Keumala, A. Bintoro, S. Salahuddin, and H. M. Yusdartono, "Analisis Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi Transformator 66 Mva Di Pltmg Sumbagut 2 Peaker Power Plant 250 Mw," *J. Energi Elektr.*, vol. 9, no. 2, p. 9, 2021, doi: 10.29103/jee.v10i1.4221.

- [24] Y. Badruzzaman and F. Himawati, "Keandalan Rele Differential sebagai Pengaman Utama Transformator terhadap Gangguan Arus Hubung Singkat di GIS Randugarut," *Issn 2252-4908*, vol. 3, pp. 159–167, 2015.
- [25] I. N. Sunaya and I. G. S. Widharma, "Analisis Koordinasi Over Current Relay Dan Ground Fault Relay Terhadap Keandalan Sistem," *J. Ilm. Vastuwidya*, vol. 3, no. 1, pp. 30–40, 2020, doi: 10.47532/jiv.v3i1.98.
- [26] G. Sihombing, "Analisis Indeks Keandalan Secara Teknis Dan Ekonomis Jaringan Distribusi 20 Kv Dengan Menggunakan Metode Section Tehnique Pada Pt.Pln (Persero) Rayon Belawan," *E-Link J. Tek. Elektro dan Inform.*, vol. 17, no. 2, p. 55, 2022, doi: 10.30587/e-link.v17i2.4683.
- [27] Pujiono, P. E. Pambudi, and Mujiman, "Analisis Pembebanan Terhadap Usia Pakai Transformator Tenaga Di Gardu Induk 150 Kv," *Elektrikal*, vol. 3, no. 1, pp. 11–20, 2016.

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



### DATA DARI PENULIS

NAMA LENGKAP : MUHAMMAD RIAN FAUZAN  
NOMOR POKOK MAHASISWA : 2107220046  
TEMPAT TANNGAL LAHIR : MEDAN, 20 MEI 2003  
ALAMAT : JL GN SINABUNG MEDAN TIMUR  
JENIS KELAMIN : LAKI-LAKI  
NO TELP. : 081262778359  
EMAIL : [muhammadrianfauzan0@gmail.com](mailto:muhammadrianfauzan0@gmail.com)

### ORANG TUA

NAMA AYAH : RUDI RIAN TO  
AGAMA : ISLAM  
NAMA IBU : MAIMUNAH BR SINAGA  
AGAMA : ISLAM  
ALAMAT : JL GN SINABUNG MEDAN TIMUR

### DAFTAR RIWAYAT PENDIDIKAN

2018 – 2021 : SMK SWASTA AL FATTAH MEDAN  
2021 – 2025 : UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH  
SUMATERA UTARA



MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH  
**UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**  
**FAKULTAS TEKNIK**

**UMSU**

Unggul | Cerdas | Terpercaya

Bila menjawab surat ini agar disebutkan nomor dan tanggalnya

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Ppi/PT/III/2024

Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003

<https://fatek.umsu.ac.id> [fatek@umsu.ac.id](mailto:fatek@umsu.ac.id) [umsumedan](https://www.facebook.com/umsumedan) [umsumedan](https://www.instagram.com/umsumedan) [umsumedan](https://www.tiktok.com/umsumedan) [umsumedan](https://www.youtube.com/umsumedan)

Nomor : 519 / II.3.AU/UMSU-07/B/2024  
Lamp : -  
Hal : Pengambilan Data

Medan, 26 Februari 1446 H  
27 Sya'ban 2025 M

Kepada Yth. : Bapak / Ibu Pimpinan  
PT. PLN (PERSERO) UPT Medan  
Gardu Induk Titikuning

Di -  
Tempat

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Dengan hormat,

Kami memohon kesediaan Bapak untuk menerima dan memberikan izin bagi Mahasiswa kami yang akan melakukan Pengambilan di PT. PLN (PERSERO) UPT Medan Gardu Induk Titikuning, untuk penulisan Tugas data Akhir, guna menyelesaikan program pendidikan Strata Satu (S-1) di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Adapun nama mahasiswa kami tersebut adalah :

Nama : Muhammad Rian Fauzan  
Npm : 2107220046  
Jurusan : Teknik Elektro  
Judul Tugas Akhir : Analisis Kinerja Sistem Proteksi Rele Differensial Pada Transformator Daya Menggunakan Matlab Simulink di PT PLN (PERSERO) UPT Medan Gardu Induk Titikuning

Pembimbing I: Dr. Rohana, ST., MT.

Data yang di cari :

1. Data Transformator Daya (60 MVA)
2. Data Proteksi Rele Differensial
3. Data Gangguan dan Pengujian Proteksi
4. Data Sistem Kelistrikan di Sekitar Transformator

Demikianlah harapan kami atas bantuan dan kerjasama bapak/ibu berikan kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh.



**Dr. Munawar Alfansury Siregar, ST., MT.**  
NIDN : 0101017202

Cc. File



Nomor : 0491/SDM.02.04/F22060000/2025  
Lampiran : 1 Lembar  
Sifat : Segera - Terbatas  
Hal : Ijin Pengambilan Data

20 Maret 2025

Kepada

Yth. Dekan  
Universitas Muhammadiyah  
Sumatera Utara  
Fakultas Teknik  
Jl.Mukhtar Basri No.3 Medan  
20238

Menunjuk surat dari Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro beralamat Jl.Mukhtar Basri No.3 Medan 20238 dengan nomor surat : 519/II.3.AU/UMSU-07/B/2024 pada tanggal 08 Maret 2025 perihal Pengambilan Data atas nama :

| No | Nama Mahasiswa       | Npm        | Jurusan        |
|----|----------------------|------------|----------------|
| 1. | Muhammad Rian Fauzan | 2107220046 | Teknik Elektro |

Bersama ini di informasikan bahwa untuk pelaksanaan pengambilan data tersebut dapat dilaksanakan di lingkungan kantor PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Gis Listrik di mulai tanggal 24 Maret 2025 sampai dengan tanggal 31 Maret 2025, adapun dalam pelaksanaan pengambilan data tersebut hal-hal yang perlu diperhatikan mahasiswa sebagai berikut :

1. Mengisi daftar hadir.
2. Menjaga etika sopan santun dan melaksanakan tata tertib di perusahaan PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan Gardu Induk Gis Listrik.
3. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menyediakan transportasi dan akomodasi.
4. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak memberikan honorarium dan konsumsi.
5. PT PLN (Persero) UIP3B Sumatera Unit Pelaksana Transmisi Medan tidak menanggung biaya pemeliharaan kesehatan dan resiko kecelakaan.
6. Mengikuti protokol kesehatan dan keselamatan (K3) yang berlaku.
7. Peserta pengambilan data tidak akan mengekspose data/informasi perusahaan kepada pihak lain.
8. Menyerahkan copy laporan pengambilan data setelah selesai dilaksanakan ke Gardu Induk Gis Listrik.
9. Untuk laporan pengambilan data ijin dan mekanisme dapat menghubungi Manager ULTG Glugur.

Demikian disampaikan untuk dapat dipergunakan seperlunya terima kasih.

MANAGER UNIT PELAKSANA  
TRANSMISI MEDAN,



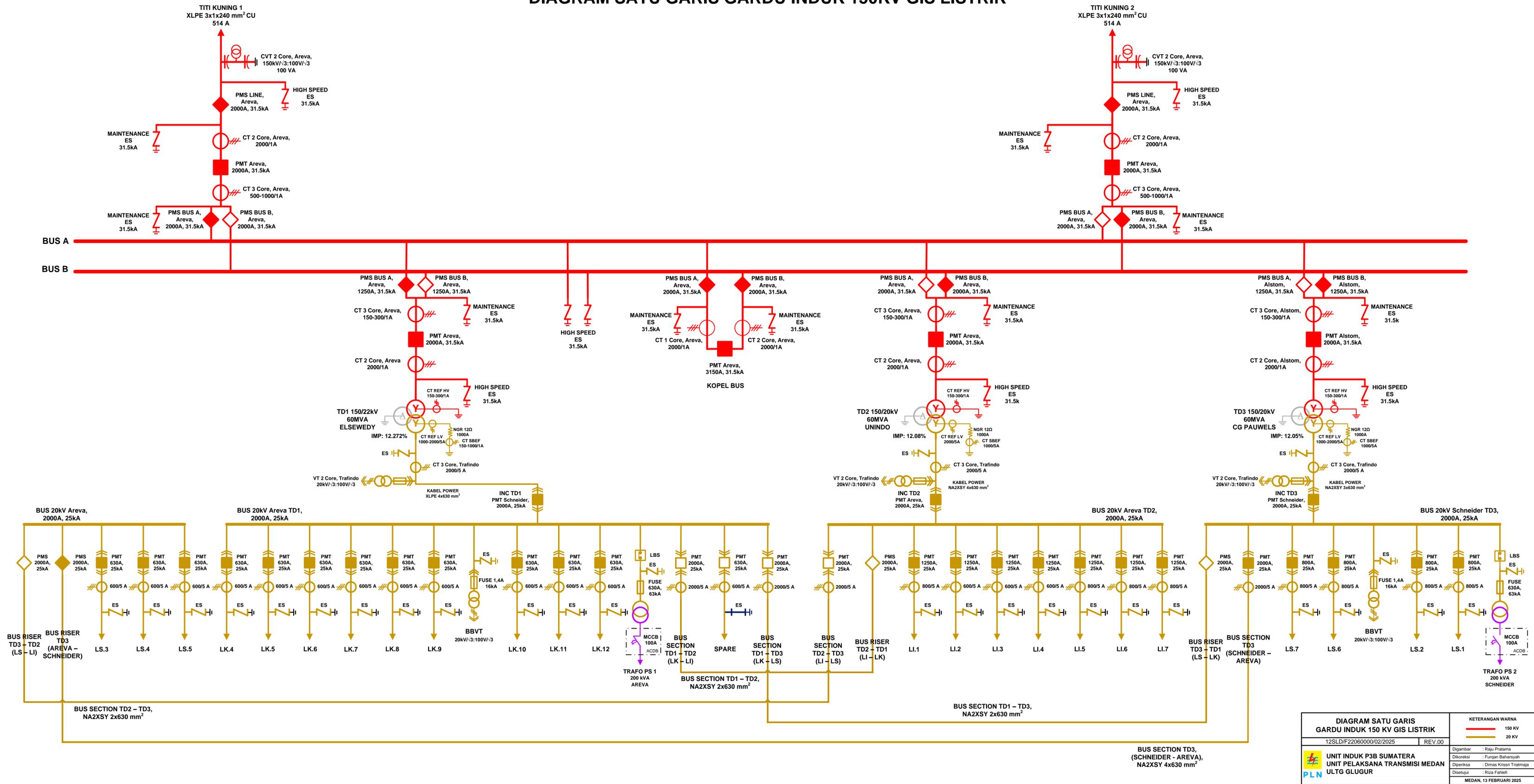
RIZA FAHLEFI

Tembusan:

1. ASMAN KEU DAN MUM UPT MEDAN PLN
2. MUL ULTG (GLUGUR) ULTG GLUGUR PLN
3. TL JARGI (GIS LIST) ULTG GLUGUR PLN

SALINAN

# DIAGRAM SATU GARIS GARDU INDUK 150KV GIS LISTRIK



| DIAGRAM SATU GARIS GARDU INDUK 150 KV GIS LISTRIK                        |                         | KETERANGAN WARNA        |  |
|--|-------------------------|-------------------------|--|
| 12SLD/F22060000/02/2025  |                         | 150 KV                  |  |
| REV.00   |                         | 20 KV                   |  |
| UNIT INDUK P3B SUMATERA<br>UNIT PELAKSANA TRANSMISI MEDAN<br>ULTG GLUGUR | Digambar                | : Raju Pratama          |  |
|  | Dikoreksi               | : Furqan Baharsyah      |  |
|  | Diperiksa               | : Dimas Krisni Trismaja |  |
|  | Ditsetujui              | : Riza Fahleli          |  |
|  | MEDAN, 13 FEBRUARI 2025 |                         |  |





LAPORAN KONDISI ( TRIP / LEPAS / MASUK ) PENYULANG 20 KV / BUS TIE 20 KV TT

BULAN : JULI 2023

GARDU GIS LISTRIK

Form.BPL / 07 a / TRAGI

| NO | NAMA<br>PENYULANG /<br>BUS TIE | URAIAN KEJADIAN    |     |       |       |     |       |           |       |     | KWH PADAM<br>MENIT JLH.KWH | INDIKASI<br>ANNUNCIATOR<br>YANG MUNCUL | RELE YANG KERJA    |   | PENYEBAB<br>KEJADIAN | MANUVER BEBAN<br>YANG TERJADI | KOMPENEN LAIN YANG<br>IKUT TRIP |
|----|--------------------------------|--------------------|-----|-------|-------|-----|-------|-----------|-------|-----|----------------------------|--|--------------------|---|----------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|    |                                | PMT TRIP / DILEPAS |     |       | BEBAN |     |       | PEMULIHAN |       |     |                            |  | INDIKASI<br>MUNCUL | KODE<br>RELE  |                      |                               |                                 |
|    |                                | KONDISI            | TGL | PKL   | KV    | AMP | PMT   | TGL       | PKL   |     |                            |  |                    |   |                      |                               |                                 |
| 1  | LI 6                           | Trip               | 6   | 10,30 | 20,3  | 83  | Masuk | 6         | 10,45 | 15  | 620,13                     | 20KV TD2 TRIP                          | OCR INST PH RST    |   |                      |                               |                                 |
| 2  | LI7                            | Trip               | 6   | 10,30 | 20,3  | 118 | Masuk | 6         | 11,50 | 80  | 4.702,01                   | 20KV TD2 TRIP                          | OCR INST PH RST    | (TERMINTAING PUTUS PH S DI GARDU HOTEL DANAU TOBA)                      |                      |                               |                                 |
| 3  | LI7                            | Trip               | 6   | 11,50 | 20,3  | 0   | Masuk | 6         | 13,02 | 72  | 0,00                       | 20KV TD2 TRIP                          | OCR INST PH RST    | DICOBA 1 KALI SAMPAI L01 GAGAL( MASUK SAMPAI DS OVER HEAD, MURNI SKTM)  |                      |                               |                                 |
| 4  | LI7                            | Lepas              | 6   | 18,51 | 20,3  | 20  | Masuk | 6         | 19,11 | 20  | 199,24                     |  |                    | Emergency dalam rangka sambung kembali over head danau toba APD (marko) |                      |                               |                                 |
| 5  | LK#6                           | lepas              | 11  | 13,08 | 20,5  | 31  | Masuk | 11        | 18,45 | 338 | 5.270,45                   |  |                    | Pekerjaan merubah HUTM ke SKTM  |                      |                               |                                 |
| 6  | LK#10                          | lepas              | 11  | 13,08 | 20,5  | 52  | Masuk | 11        | 14,56 | 108 | 2.824,86                   |  |                    | Pekerjaan melepas jumperan LK#6   |                      |                               |                                 |
| 7  | LK#6                           | lepas              | 11  | 19,47 | 20,4  | 8   | Masuk | 11        | 20,15 | 28  | 112,12                     |  |                    | Putaran phasa terbalik  |                      |                               |                                 |
|    |                                | Trip               |     |       |       |     | Masuk |           |       |     | 0,00                       |  |                    |   |                      |                               |                                 |
|    |                                | Trip               |     |       |       |     | Masuk |           |       |     | 0,00                       |  |                    |   |                      |                               |                                 |
|    |                                | Trip               |     |       |       |     | Masuk |           |       |     | 0,00                       |  |                    |   |                      |                               |                                 |
|    |                                | Trip               |     |       |       |     | Masuk |           |       |     | 0,00                       |  |                    |   |                      |                               |                                 |