

ANALISA KINERJA RELAY DIFERENSIAL PADA TRANSFORMATOR DAYA DI GARDU INDUK SIRIMAU MENGUNAKAN ETAP

Dina Amalia Sella¹, Elisabeth T. Mbitu², Marselin Jamlaay³

¹²³*Teknologi Rekayasa Sistem Kelistrikan Migas, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Ambon,*
dinaamaliasella674@gmail.com¹, elisabethtansianambitu@gmail.com², marselin90@gmail.com³

Abstract - Power transformer protection systems are vital components in maintaining the reliability and safety of electrical power systems. This research aims to analyze the performance of differential relays as the main protection for a 60 MVA power transformer at Sirimau Substation using ETAP 19.01 software. The research methodology includes protection parameter calculations, differential relay settings, and simulation of both internal and external faults in the transformer system. The calculation results show a nominal current of 230.94 A on the 150 kV primary side and 1574.59 A on the 22 kV secondary side. The error mismatch values obtained were 0.1955% on the primary side and 0.2045% on the secondary side, still within the maximum standard tolerance limit of 5%. The CT secondary current on the primary side (I_1) is 3.849 A and on the secondary side (I_2) is 3.936 A. The differential current (I_d) is calculated as 0.087 A with a restraining current (I_r) of 3.8925 A, resulting in a slope percentage of 2% and relay setting current of 0.0778 A. The results of the differential relay simulation show that the differential relay operates optimally during an internal short-circuit fault in the transformer by tripping the circuit breaker to protect the transformer and prevent the fault from propagating to other components.

Keywords: differential relay, protection system, transformer.

Abstrak - Sistem proteksi transformator daya merupakan komponen vital dalam menjaga keandalan dan keamanan sistem tenaga listrik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja relay diferensial sebagai proteksi utama transformator daya 60 MVA pada Gardu Induk Sirimau dengan menggunakan software ETAP 19.01. Metode penelitian meliputi perhitungan parameter proteksi, setting relay diferensial, dan simulasi gangguan internal maupun eksternal pada sistem transformator. Hasil perhitungan menunjukkan arus nominal pada sisi primer 150 kV sebesar 230,94 A dan sisi sekunder 22 kV sebesar 1574,59 A. Nilai error mismatch diperoleh sebesar 0,1955% pada sisi primer dan 0,2045% pada sisi sekunder, masih dalam batas toleransi standar maksimal 5%. Arus sekunder CT pada sisi primer (I_1) sebesar 3,849 A dan sisi sekunder (I_2) sebesar 3,936 A. Arus diferensial (I_d) dihitung sebesar 0,087 A dengan arus penahan (I_r) 3,8925 A, menghasilkan persentase slope 2% dan arus setting relay 0,0778 A. Hasil simulasi rele diferensial menunjukkan rele diferensial bekerja dengan optimal pada saat terjadi gangguan internal hubung singkat pada transformator dengan mentripkan CB untuk mengamankan Transformator dan agar gangguan tidak merambat ke komponen lainnya.

Kata kunci: relay diferensial, sistem proteksi, transformator.

I. PENDAHULUAN

Proteksi adalah suatu bentuk perlindungan terhadap peralatan listrik yang berguna menghindari kerusakan peralatan dan juga agar stabilitas penyaluran tenaga listrik tetap terjaga. Sistem proteksi harus dapat bekerja untuk memutuskan arus gangguan yang muncul pada sistem dengan cepat dan selektif. Adanya sistem proteksi tersebut berfungsi untuk melindungi peralatan dari kerusakan akibat adanya arus gangguan (Nasution et al. 2015). Transformator daya merupakan suatu perangkat listrik yang digunakan untuk mentransfer daya dari satu rangkaian ke rangkaian lainnya dengan mengubah tegangan tanpa mempengaruhi frekuensi (Miftahul, 2024). Transformator berfungsi untuk menyalurkan tenaga listrik dari tegangan tinggi ke rendah atau sebaliknya dan diharapkan beroperasi secara maksimal karena dapat mempengaruhi distribusi tenaga Listrik (Farabi, S. M., & Putri, R. 2022). Kegagalan transformator dapat menyebabkan gangguan serius dalam pasokan listrik dan potensi kerugian besar, baik dari segi ekonomi maupun keselamatan. Gangguan pada transformator dapat mengakibatkan gangguan penyediaan listrik bahkan merusak transformator itu sendiri. Permasalahan yang terjadi pada Transformator dapat

menyebabkan terjadinya hubung singkat. Akibat dari hubung singkat tersebut maka diperlukan adalah relay differensial transformator. Relay differensial adalah proteksi utama relay pada saat terjadi gangguan. Relay differensial ini dibatasi oleh pemasangan kedua transformator arus sisi incoming dan outgoing dikarenakan rele ini tidak dapat dijadikan cadangan (IRSYAD 2022).

Gardu Induk Sirimau merupakan Gardu Induk dengan kapasitas Trafo yang terpasang sebesar 2 x 60 MVA, dimana GI Sirimau mendapatkan suplai listrik dari GIS Passo melalui jaringan transmisi 150 kV sepanjang 16,4 km dengan total 40 Unit tower. GI sirimau memiliki tegangan operasi 150 kV. Berdasarkan latar belakang tersebut maka peneliti akan melakukan penelitian dengan judul "Kinerja Relay Diferensial Pada Transformator Daya Di Gardu Induk Sirimau Menggunakan Etap".

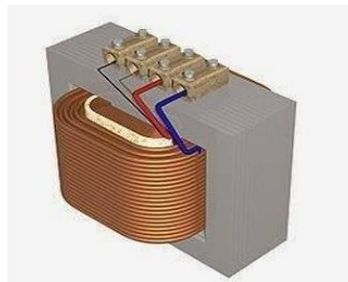
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator atau lebih dikenal dengan nama "transformer" atau "trafo" sejatinya adalah suatu peralatan listrik yang mengubah daya listrik AC pada satu level tegangan yang satu ke level tegangan lainnya tanpa merubah frekuensinya. Transformator biasa digunakan untuk mentransformasikan tegangan (menaikkan atau menurunkan tegangan AC). Transformator terdiri dari dua atau lebih kumparan yang membungkus inti besi feromagnetik. Kumparan-kumparan tersebut biasanya satu sama lain tidak dihubungkan secara langsung. Kumparan yang satu dihubungkan dengan sumber listrik AC (kumparan primer) dan kumparan yang lain mensuplai listrik ke beban (kumparan sekunder). Bila terdapat lebih dari dua kumparan maka kumparan tersebut akan disebut sebagai kumparan tersier, kuarter, dst.

Transformator adalah suatu peralatan mesin listrik statis yang bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik untuk menyalurkan tenaga/daya listrik dari suatu rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain tanpa merubah frekuensi. Pada umumnya transformator terdiri dari 2 belitan yaitu belitan primer dan belitan sekunder, dan ada juga transformator yang secara khusus memiliki belitan tersier sehingga menjadi 3 belitan. Bagian utama transformator adalah dua buah kumparan yang keduanya dililitkan pada sebuah inti besi lunak. Kedua kumparan tersebut memiliki jumlah lilitan yang berbeda. Kumparan yang dihubungkan dengan sumber tegangan AC.

Bagian utama transformator adalah dua buah kumparan yang keduanya dililitkan pada sebuah inti besi lunak. Kedua kumparan tersebut memiliki jumlah lilitan yang berbeda. Kumparan yang dihubungkan dengan sumber tegangan AC disebut kumparan primer, sedangkan kumparan yang lain disebut kumparan sekunder (Abdul K, 2009) dapat dilihat pada gambar 2.1. Transformator.



Gambar 2. 1 Transformator
(Sumber : Abdul K, 2009)

2.2 Relai Diferensial

Relai diferensial adalah salah satu relai pengaman utama sistem tenaga listrik yang bekerja seketika tanpa koordinasi relai disekitarnya sehingga waktu kerja dapat dibuat secepat mungkin. Daerah pengamanannya dibatasi oleh pasangan trafo arus dimana relai diferensial dipasang sehingga relai diferensial tidak dapat dijadikan sebagai pengaman cadangan untuk daerah berikutnya. Proteksi relai diferensial bekerja dengan prinsip keseimbangan arus (current balance).

Prinsip ini berdasarkan hukum kirchhoff yaitu membandingkan jumlah arus masuk ke primer (I_p) sama dengan jumlah arus yang keluar dari sekunder (I_s). (Kadarisman, No Year: 8-20).

$$I_{\text{Diferensial}} = I_d = |I_p| + |I_s| \dots \dots \dots (2-1)$$

(Sumber : Bien, L. E., & Helna, D, 2007)

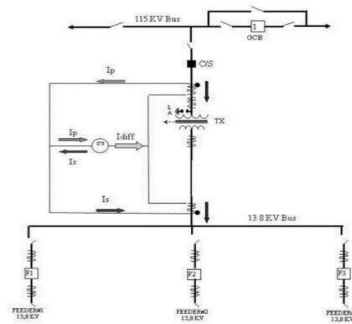
Dimana:

I_d = Arus Diferensial (A)

I_p = Arus Sisi Masuk (A)

I_s = Arus Sisi Keluar (A)

Gambar 2.10. menunjukkan relai Diferensial dalam keadaan arus normal, dimana I_p dan I_s sama besar dan berlawanan arah.



Gambar 2. 2 Relai Diferensial Saat Arus Normal
(Sumber : Bien, L. E., & Helna, D, 2007).

$$I_d = I_p + I_s = 0 \text{ Ampere} \dots \dots \dots (2-2)$$

$$I_{dif} = I_p + I_s = 0 \text{ Ampere} \dots \dots \dots (2-3)$$

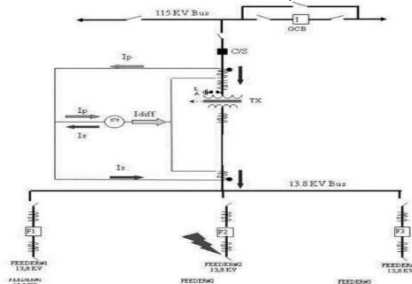
(Sumber : Bien, L. E., & Helna, D, 2007)

Maka tidak ada tegangan yang melintasi coil relay dan tidak ada arus yang mengalir pada relai tersebut, sehingga relai Diferensial tidak bekerja.

(J lewis, Blackburn, 2004: 10).

2.3 Gangguan Diluar Daerah yang Dilindungi

Pada gangguan diluar (eksternal) daerah proteksi relai Diferensial (diluar kedua trafo arus), relai Diferensial tidak akan bekerja, karena I_p dan I_s sama besar dan berlawanan arah ($I_d = I_p + I_s = 0 \text{ Ampere}$, $I_{dif} = I_p + I_s = 0 \text{ Ampere}$), seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.11. berikut. (J lewis, 2003: 10).



Gambar 2. 3 Relai Diferensial Saat Gangguan Eksternal
(Sumber : Bien, L. E., & Helna, D, 2007).

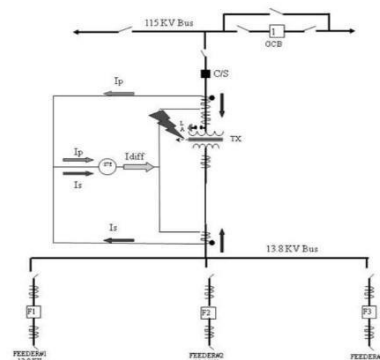
2.4 Gangguan Didalam Daerah yang Dilindungi

Untuk gangguan didalam (internal) daerah proteksi relai Diferensial (diantara kedua trafo arus), I_p dan I_s searah. (Sumber : Bien, L. E., & Helna, D, 2007)

$$I_d = I_p + I_s > 0 \text{ Ampere} \dots \dots \dots (2-4)$$

$$I_{dif} = I_p + I_s > 0 \text{ Ampere} \dots \dots \dots (2-5)$$

Karena arus akan menuju titik gangguan, sehingga relai Diferensial akan bekerja, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2. 4 Relai Diferensial Saat Gangguan Internal
(Sumber : Bien, L. E., & Helna, D, 2007).

Pada saat ada arus yang mengalir lewat relai, maka relai akan mengirim sinyal pada *lock out relay*. Sinyal ini akan di teruskan ke C/S dan memerintahkannya untuk lock out sehingga aliran energi listrik terputus, maka transformator tenaga yang diamankan bebas dari pengaruh gangguan yang ada.

2.5 Perhitungan Matematis

1. Rasio CT

Perhitungan ini memiliki tujuan utama untuk mendapatkan rasio yang optimal dengan memilih rasio yang paling mendekati arus rating yang diinginkan (Keumala dkk., 2021). Selain itu, perhitungan ini juga dipakai untuk mengevaluasi tingkat kesalahan mismatch. Sebelum menentukan rasio CT, perlu dilakukan perhitungan terlebih dahulu untuk mendapatkan nilai arus nominal dan arus rating. Arus rating (I_{rat}) memiliki peran penting sebagai batasan dalam menentukan rasio CT yang tepat untuk diterapkan. Arus nominal (I_n) adalah nilai arus yang mengalir dalam masing-masing jaringan listrik, baik pada tegangan tinggi maupun tegangan rendah. Perhitungan arus nominal di sisi primer dan sekunder dapat menggunakan rumus: (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$I_{n1} = \frac{V_p}{\sqrt{3} \cdot V_p} \dots \dots \dots (2-8)$$

$$I_{n2} = \frac{V_s}{\sqrt{3} \cdot V_s} \dots \dots \dots (2-9)$$

Dalam perhitungan arus rating pada sisi primer dan sekunder dapat menggunakan rumus: (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$I_{rat1} = 110\% \times I_n \dots \dots \dots (2-10)$$

Dimana I_n adalah arus nominal (A), S adalah kapasitas transformator (VA), V_p adalah tegangan primer (V), V_s adalah tegangan sekunder (V), I_{rat} adalah arus rating (A).

2. Error Mismatch

Tujuannya adalah untuk melakukan perbandingan antara rasio ideal dari transformator arus (CT) dengan rasio yang tersedia di pasar, dengan persyaratan bahwa tingkat kesalahan (error) Tidak diperbolehkan melebihi 5% dari nilai rasio CT yang telah ditentukan (Subari & Hapsari Kusumastuti, 2015). Perhitungan rasio CT dan *error mismatch* di sisi primer dan sekunder dapat menggunakan rumus: (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$\text{Rasio CT}_1 (\text{ideal}) = \text{rasio CT}^2 \times \frac{V_s}{V_p} \dots \dots \dots (2-11)$$

$$\text{Rasio CT}_2 (\text{ideal}) = \text{rasio CT}^1 \times \frac{V_p}{V_s} \dots \dots \dots (2-12)$$

Rumus yang digunakan untuk menentukan besarnya error mismatch adalah sebagai berikut: (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$\text{Error Mismatch} = \frac{CT \text{ Ideal}}{CT \text{ Terpasang}} \times 100\% \dots \dots \dots (2-13)$$

(Pandawa, F. S. A., Tasmono, H., & Widagdo, R. S., 2023)

Dimana rasio CT_1 adalah rasio CT ideal sisi primer (A), rasio CT_2 ideal adalah rasio CT ideal sisi sekunder (A), rasio CT_1 adalah rasio CT primer yang terpasang (A), *rasio CT_2* adalah rasio CT sekunder yang terpasang (A), V_p adalah tegangan primer (V), dan V_s adalah tegangan sekunder (V). (*Error Mismatch*) adalah kesalahan pembacaan arus (%).

3. Arus Sekunder

Arus sekunder CT adalah hasil keluaran dari transformator daya yang terdeteksi oleh CT dan digunakan sebagai masukan ke Relay. Dengan menggunakan perhitungan ini, Relay Diferensial dapat mendeteksi adanya perbedaan arus antara sisi sekunder CT yang menunjukkan kemungkinan adanya gangguan atau kegagalan dalam sistem. (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$I_{\text{sekunder}} = \frac{1}{\text{rasio CT}} \times I_n \dots \dots \dots (2-14)$$

Dimana I_{sekunder} adalah arus keluaran transformator arus (A), *rasio CT* adalah rasio CT yang terpasang (A), I_n adalah arus nominal (A).

4. Arus Diferensial

Untuk menghitung arus Diferensial (I_d), digunakan persamaan yang memperhitungkan selisih antara arus sekunder pada sisi primer dan sekunder. Dalam kasus penggunaan Relay Diferensial bias yang beroperasi berdasarkan persentase arus, nilai I_1 (arus sekunder 20 kV) dan I_2 (arus sekunder 150 kV) dapat ditentukan dengan persamaan berikut: (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$I_d = |I_2 - I_1| \dots \dots \dots (2-15)$$

Relay Diferensial yang diterapkan dalam sistem beroperasi berdasarkan persentase dari arus (Fauzi dkk., 2020), sehingga untuk mendapatkan nilai I_1 dan I_2 menjadi pu maka arus tersebut dibagi dengan I_{base} . Dimana I_{base} dalam penelitian ini adalah arus nominal pada masing masing CT. Untuk mencari nilai arus Diferensial yang terbaca oleh Relay, dapat digunakan persamaan sebagai berikut. (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$I_d = \left| \frac{I_2'}{I_{\text{base}}} - \frac{I_1'}{I_{\text{base}}} \right| \dots \dots \dots (2-16)$$

Dimana I_d adalah arus Diferensial (pu), I_1 adalah arus sekunder 150kV (pu), I_2 adalah arus sekunder 20kV (pu), I_1' adalah arus beban CT 150kV (A), I_2' adalah arus beban CT 20kV (A), dan I_{base} adalah arus dasar (pu).

5. Arus Restrain

Perhitungan arus restrain/arus penahan dilakukan untuk menentukan arus penahan yang mencegah Relay aktif pada kondisi normal.

Perhitungan arus restrain tersebut kemudian digunakan untuk menghitung persentase kecuraman dan arus

setting pada Relay Diferensial. (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$I_r = \frac{I_1 I_2}{2} \quad (2-17)$$

Dimana I_r adalah arus restrain (pU), I_2 adalah arus sekunder 20 kV (A), I_1 adalah arus sekunder 150 kV (A).

6. Percent Slope

Pada $Slope_1$ memiliki peran penting dalam mengkalkulasikan nilai arus Diferensial dan arus restrain pada kondisi normal. (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$Slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% \quad (2-18)$$

$$Slope_2 = \left(\frac{I_d}{I_r} \times 2 \right) \times 100\% \quad (2-19)$$

Fungsi utamanya adalah memastikan sensitivitas Relay Diferensial saat terjadi gangguan internal dengan arus yang relatif kecil. Di sisi lain, $slope_2$ berperan untuk mencegah pengaktifan Relay Diferensial akibat gangguan eksternal dengan tingkat arus gangguan yang signifikan, yang dapat menyebabkan satu dari dua current transformer (CT) mengalami saturasi. Ada dua rumus yang digunakan untuk menghitung nilai $slope_1$ dan $slope_2$:

Dimana $slope_1$ adalah setting kecuraman 1 (%), $slope_2$ adalah setting kecuraman 2 (%), I_r adalah arus penahan (pu), I_d adalah arus Diferensial (pu).

7. Arus Setting

Untuk mendapatkan nilai arus setting, dilakukan perkalian antara nilai slope dan arus penahan. Berikut adalah rumus matematis yang digunakan untuk mencari nilai $I_{setting}$. (Pandawa, F. S. A., dkk., 2023).

$$I_{setting} = \%Slope \times I_r \quad (2-20)$$

Dimana $I_{setting}$ adalah arus setting (A), $\%Slope$ adalah setting kecuraman (%), I_r adalah arus restrain (A).

III. METODE

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

3.1.1 Tempat

Penelitian ini dilakukan pada Gardu Induk Sirimau, yang beralamat di jalan Wem Tehupelory area Arbes/Stain. Desa Batu Merah, Kecamatan Sirimau, Kota Ambon, Provinsi Maluku.

3.1.2 Waktu Penelitian

Waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan penelitian ini adalah selama 2 (dua) bulan. (dapat dilihat pada lampiran 1 pada skripsi ini)

3.2 Alat dan bahan

Tabel 3. 1 Alat dan bahan

Alat dan Bahan	Kegunaan
Buku referensi / jurnal ilmiah	Sebagai acuan teori
Buku dan pena	Untuk mencatat hasil Penelitian
Kalkulator	Dilakukan untuk menghitung hasil perhitungan matematis relay diferensial
Laptop	Untuk membuat laporan
Software	Aplikasi ETAP

3.3 Jenis Data Penelitian

3.3.1 Jenis

Jenis yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuantitatif karena dalam penelitian ini datanya berupa angka – angka dan analisis menggunakan statistic.

3.3.2 Data Primer

Data primer diperoleh dari wawancara dan observasi langsung di lapangan.

3.3.3 Data Sekunder

Data sekunder diambil langsung dari data PLN Gardu Induk Sirimau.

Adapun data – data sekunder tersebut antara lain:

1. Data Single Line Diagram
2. Data Transformator Daya
3. Data Beban
4. Data Relay Diferensial

3.4 Teknik Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini penulis menggunakan beberapa teknik pengumpulan data yaitu:

3.4.1 Studi literatur

Membaca teori dari berbagai sumber, yaitu buku, jurnal, internet, dan informasi yang berkaitan dengan masalah yang dibahas.

3.4.2 Observasi

Dalam penelitian ini penulis mengambil dan mengumpulkan data melalui observasi dilakukan di Gardu Induk Sirimau.

3.4.3 Wawancara

Dalam penelitian ini, peneliti akan melakukan wawancara / tanya jawab langsung dengan staf atau karyawan untuk mendapatkan penjelasan tentang Relay Diferensial pada Gardu Induk Sirimau.

3.5 Teknik Analisis

Data-data yang diperoleh dari lapangan masih berupa data sekunder. Proses pengolahan data dimulai dengan data transformator, yaitu nilai kapasitas trafo, nilai primer dan nilai sekunder, selanjutnya melakukan perhitungan matematis, setelah melakukan perhitungan, dilakukan simulasi gangguan internal dan eksternal pada software ETAP.

3.6 Definisi Operasional

Definisi operasional menjelaskan lebih dalam terkait judul atau istilah yang muncul pada tulisan. Sesuai dengan judul proposal di atas maka definisi operasionalnya sebagai berikut:

1. Kinerja

Kinerja secara umum merujuk pada kemampuan suatu sistem, alat, atau perangkat untuk menjalankan fungsi atau tugasnya sesuai dengan tujuan dan standar yang ditetapkan.

2. Relay Diferensial

Relay Diferensial adalah salah satu relay pengaman utama sistem tenaga listrik yang bekerja seketika tanpa koordinasi relai disekitarnya sehingga waktu kerja dapat dibuat secepat mungkin.

3. Transformator Daya

Transformator daya adalah peralatan listrik yang berfungsi untuk menaikkan (step-up) atau menurunkan (step-down) tegangan listrik dalam sistem tenaga listrik.

4. Gardu Induk

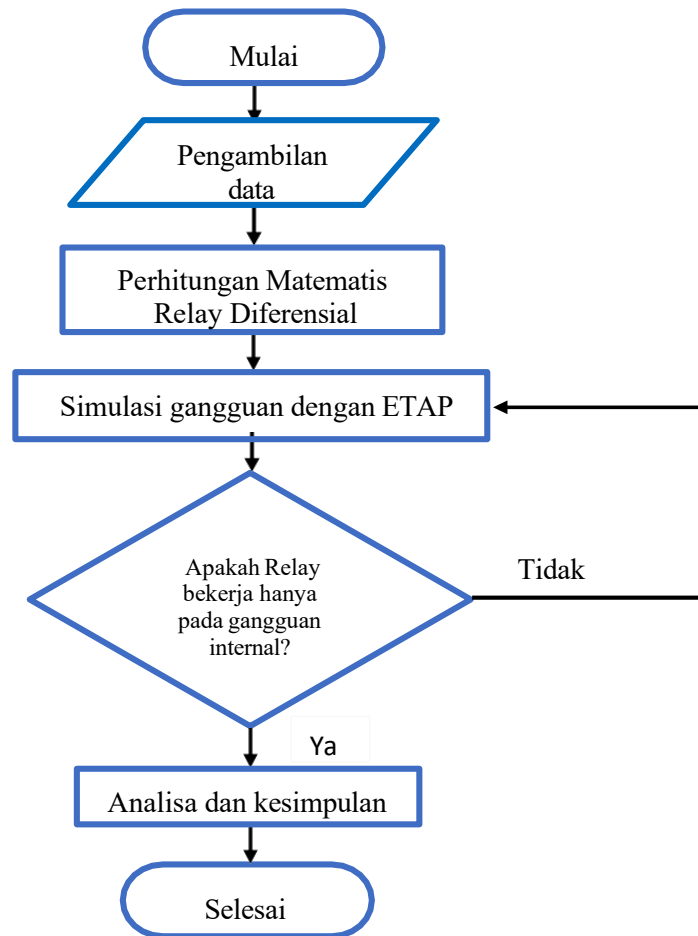
Gardu induk adalah instalasi atau fasilitas dalam sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk menerima, mengubah, dan menyalurkan tenaga listrik dari tingkat tegangan tinggi ke tegangan tinggi lainnya atau ke tegangan menengah, serta melakukan pengukuran, pengawasan, pengaturan operasi, dan pengamanan sistem tenaga listrik.

5. ETAP

Electric Transient and Analysis Program (ETAP) merupakan suatu perangkat lunak yang mendukung simulasi sistem tenaga listrik.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini:



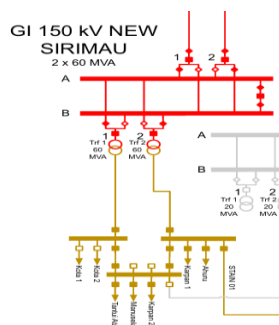
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil

Penelitian ini dilakukan pada Gardu Induk Sirimau, yang beralamat di jalan Wem Tehupelory area Arbes/Stain. Desa Batu Merah, Kecamatan Sirimau, Kota Ambon, Provinsi Maluku. Waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan penelitian ini adalah selama 2 (dua) bulan

Data-data yang diperoleh dari lapangan masih berupa data sekunder. Proses pengolahan data dimulai dengan data transformator, yaitu nilai kapasitas trafo, nilai primer dan nilai sekunder, selanjutnya melakukan perhitungan matematis, setelah melakukan perhitungan, dilakukan simulasi gangguan internal dan eksternal pada software ETAP.

4.1.1 Data Transformator



Gambar 1. *Singel Line Diagram (SLD)*

Tabel 4. 1 Tabel Spesifikasi Pasaran Rasio CT

Tegangan Sistem	Rasio CT (Pasaran Umum)	Penggunaan	Referensi/Standar
20 kV	200/5 A, 300/5 A, 400/5 A	Penyulang Distribusi	SPLN/PULL 2011
70 kV	600/5 A, 800/5 A, 1000/5 A	Sistem Transmisi Mengenah	IEEE Std C57.13
150 kV	600/5 A, 800/5 A, 1200/5 A	Gardu Induk Pada 150 kV	IEC 60044-1
500 kV	2000/5 A, 2500/5 A, 3000/5 A	Interkoneksi Jaringan Utama	IEC 61869

Tabel 4. 2 Data Beban Penyulang

Nama Penyulang	Beban
Ahuru	2,2
Karpan 1	2,8
Karpan 2	2,8
Stain 1	2,4
Tantui Atas	0,8
Manusela	2,3
Kota 1	0
Kota 2	0

Tabel 4. 3 Data Relay Diferensial

Totally Integrated Automation Portal		
I-DIFF Unrush blocking		
Number	Settings	Value
901.1691.11041.115	Blocking with 2. harmonic	Settings group 1: yes
901.1691.11041.116	2nd harmonic content	Settings group 1: 15 %
901.1691.11041.117	Crossblock. time 2nd har.	Settings group 1: 0 s
901.1691.11041.118	Blocking with CWA	Settings group 1: no
I-DIFF IOverexcit. blocking		
Number	Settings	Value
901.1691.11041.121	Blocking with 3rd harm.	Settings group 1: no
901.1691.11041.122	3rd harmonics content	Settings group 1: 30 %
901.1691.11041.123	Crossblock. time 3rd har.	Settings group 1: 0 s
901.1691.11041.124	Blocking with 5th harm.	Settings group 1: yes
901.1691.11041.125	5th harmonics content	Settings group 1: 35 %
901.1691.11041.126	Crossblock. time 5th har.	Settings group 1: 0 s
901.1691.11041.127	Limit Idiff 3., 5. harmonics	Settings group 1: 1.5 IIRObj
I-DIFF IExt. fault detection		
Number	Settings	Value
901.1691.11041.128	Threshold add-on stabiliz.	Settings group 1: 4 IIRObj
901.1691.11041.129	Time of add-on stabiliz.	Settings group 1: 0.3 s
901.1691.11041.130	Crossbik. time add-on st.	Settings group 1: 0.3 s
I-DIFF fast		
Number	Settings	Value
901.1691.11071.1	Mode	Settings group 1: on
901.1691.11071.3	Threshold	Settings group 1: 8 IIRObj
901.1691.11071.6	Operate delay	Settings group 1: 0 s
901.1691.11071.100	Operate & flt.rec. blocked	Settings group 1: no

4.1.2 Perhitungan Matematis

Untuk memperoleh nilai setting relay diferensial maka diperlukan melakukan perhitungan yang meliputi nilai rasio CT, error mismatch, perolehan arus sekunder, perhitungan arus diferensial, arus penahan (restrain), penetapan persentase kecuraman, penentuan nilai pengaturan arus diferensial, serta perhitungan saat terjadi gangguan pada rele diferensial.

a. Menentukan Rasio CT

Perhitungan arus nominal pada sisi primer (150 kV) dan sisi sekunder (22 kV) dihitung dengan menggunakan Persamaan 2-8 dan 2-9 :

$$I_{rating} = 110\% \times I_{nominal}$$

$$I_{nominal} = \frac{S}{\sqrt{3} \times V}$$

$$I_{n1} = \frac{60.000}{\sqrt{3} \times 150} = 230,94 \text{ A}$$
$$I_{n1} = \frac{60.000}{\sqrt{3} \times 22} = 1574,59 \text{ A}$$

Perhitungan Arus Rating di sisi Primer dan Sekunder dihitung dengan menggunakan persamaan 2-10 :

$$I_{rating 1} = 110\% \times 230,94 = 254,034 \text{ A}$$

$$I_{rating 2} = 110\% \times 1574,59 = 1732,049 \text{ A}$$

Dari hasil perhitungan di atas diperoleh nilai arus nominal yang mengalir pada transformator sisi primer 150 kV yaitu sebesar 230,94 A dan pada transformator sisi sekunder 22 kV yaitu 1574,59 A. Kemudian diperoleh nilai arus rating pada sisi primer 150 kV yaitu sebesar 254,034 A dan pada sisi sekunder 22 kV yaitu sebesar 1732,049 A. Berdasarkan perhitungan arus rating pada kedua sisi tegangan transformator dan juga disesuaikan dengan spesifikasi rasio CT yang ada di pasaran, maka diperoleh perbandingan rasio CT untuk sisi primer 150 kV (CTp) adalah 300 : 5 A dan pada sisi sekunder 22 kV (CTs) adalah 2000 : 5 A.

b. Error Mismatch

Tujuannya adalah untuk melakukan perbandingan antara rasio ideal dari transformator arus (CT) dengan rasio yang tersedia di pasar, dengan persyaratan bahwa tingkat kesalahan (error) Tidak diperbolehkan melebihi 5% dari nilai rasio CT yang telah ditentukan (Subari & Hapsari Kusumastuti, 2015).

Sebelum menghitung *Error Mismatch* terlebih dahulu mencari nilai CT ideal:

Perhitungan Nilai CT Ideal dilakukan dengan menggunakan persamaan 2-11, 2-12, dan 2-13 :

Perhitungan di sisi primer

$$CT_p (\text{Ideal}) = CT_s \times \frac{V_s}{V_p}$$
$$= \frac{2000}{5} \times \frac{22}{150} = 58,66$$

$$Error \text{ Mismatch} = \frac{CT \text{ Ideal}}{CT \text{ Terpasang}} \times \%$$
$$= \frac{58,66}{300} \times \% = 0,1955\%$$

Perhitungan di sisi sekunder

$$CT_p (\text{Ideal}) = CT_s \times \frac{V_s}{V_p}$$
$$= \frac{300}{5} \times \frac{150}{22} = 409,09 \text{ A}$$

$$Error \text{ Mismatch} = \frac{CT \text{ Ideal}}{CT \text{ Terpasang}} \times \%$$
$$= \frac{409,09}{2000} \times \% = 0,2045\%$$

Berdasarkan dari hasil perhitungan diatas diperoleh nilai CTp ideal pada sisi primer sebesar 58,66 A serta *error mismatch* sebesar 0,1955%. Pada sisi sekunder diperoleh nilai CTs sebesar 409,09 A serta *error mismatch* sebesar 0,2045%.

c. Arus Sekunder

Perhitungan Arus Sekunder dihitung dengan menggunakan persamaan 2-14:

$$I_{\text{Sekunder}} = \frac{1}{\text{Rasio CT}} \times I_n$$

Arus Sekunder CT pada sisi primer :

$$I_{\text{Sekunder}} = \frac{5}{300} \times 230,94 = 3,849 \text{ A}$$

Arus sekunder CT pada sisi Sekunder :

$$I_{\text{Sekunder}} = \frac{5}{2000} \times 1574,59 = 3,936 \text{ A}$$

d. Arus Diferensial

Untuk menghitung arus Diferensial (I_d), digunakan persamaan yang memperhitungkan selisih antara arus sekunder pada sisi primer dan sekunder. Dapat ditentukan dengan persamaan 2-15:

$$I_d = I_s - I_p$$
$$= 3,936 - 3,849 = 0,087 \text{ A}$$

e. Arus Restrain

Perhitungan arus restrain / arus penahan dilakukan untuk menentukan arus penahan yang mencegah relay aktif pada kondisi normal. Perhitungan arus restrain tersebut kemudian digunakan untuk menghitung persentase kecuraman dan arus setting pada relay Diferensial. Perhitungan arus restrain dihitung dengan menggunakan persamaan 2-17:

$$I_r = \frac{I_p + I_s}{2}$$

$$I_r = \frac{3,849 + 3,936}{2} = 3,8925 \text{ A}$$

f. Percent Slope %

Pada *Slope1* memiliki peran penting dalam mengkalkulasikan nilai arus Diferensial dan arus restrain pada kondisi normal. Fungsi utamanya adalah memastikan sensitivitas Relay Diferensial saat terjadi gangguan internal dengan arus yang relatif kecil. Di sisi lain, slope2 berperan untuk mencegah pengaktifan relay Diferensial akibat gangguan eksternal dengan tingkat arus gangguan yang signifikan, yang dapat menyebabkan satu dari dua current transformer (CT) mengalami saturasi. Perhitungan Percent Slope dihitung dengan menggunakan persamaan 2-18 dan 2-19:

$$Slope_1 = \frac{I_d}{I_r} \times 100\% = \frac{0,087}{3,8925} \times 100\% = 2\%$$

$$Slope_1 = \left(\frac{I_d}{I_r} \times 2 \right) \times 100\% = \left(\frac{0,087}{3,8925} \times 2 \right) \times 100\% = 4\%$$

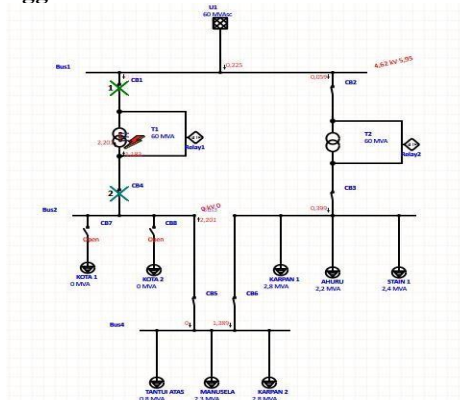
g. Arus Setting Relay

Untuk mendapatkan nilai arus setting, dilakukan perkalian antara nilai slope dan arus penahan. Perhitungan $I_{setting}$ dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2-20:

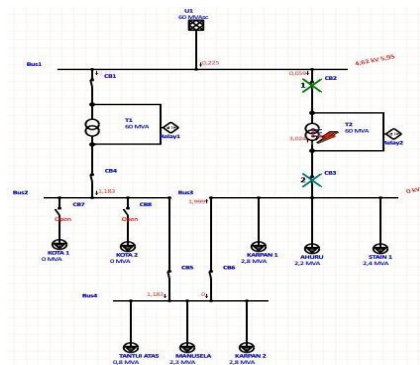
$$I_{setting} = \%Slope \times I_r = 2\% \times 3,8925 = 0,0778 \text{ A}$$

4.2 Pembahasan

4.2.1 Simulasi Ketika Terjadi Gangguan Internal



Gambar 4. 1 Simulasi gangguan pada Trafo 1



Gambar 4. 2 simulasi gangguan pada Trafo 2

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between CT2 & T1. Adjacent bus: Bus2					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 11-08-2025	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
20,0	Relay1		20,0		Phase - 87
80,0	CB1		60,0		Tripped by Relay1 Phase - 87
80,0	CB4		60,0		Tripped by Relay1 Phase - 87

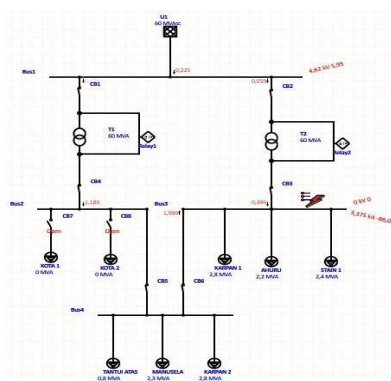
Gambar 4. 3 Analisa simulasi gangguan pada Trafo 1

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between CT4 & T2. Adjacent bus: Bus3					
Data Rev.: Base		Config: Normal		Date: 11-08-2025	
Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
20,0	Relay2		20,0		Phase - 87
80,0	CB2	60,0			Tripped by Relay2 Phase - 87
80,0	CB3	60,0			Tripped by Relay2 Phase - 87

Gambar 4. 4 Analisa simulasi gangguan pada Trafo 2

Hasil simulasi menunjukkan bahwa ketika terjadi gangguan internal pada Trafo 1, rele diferensial (relay 1) akan bekerja dengan memerintahkan CB1 dan CB4 untuk trip agar gangguan tidak merambat ke komponen lain dengan waktu delay 60 ms. Begitu juga pada saat terjadi gangguan internal pada Trafo 2, rele diferensial (relay 2) akan bekerja dan mentripkan CB2 dan CB3 dengan waktu delay 60 ms.

4.2.2 Simulasi Gangguan Eksternal



Gambar 4. 5 Simulasi gangguan eksternal pada Bus 22 kV

Saat terjadi gangguan eksternal pada Bus 22 kV, arus primer dan sekunder seimbang sehingga rele diferensial tidak bekerja. Hal ini juga dapat disebabkan karena arus rele diferensial lebih kecil dari arus setting, sehingga rele diferensial tidak bekerja (Primawati, Era. 2019).

V. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

Sistem proteksi rele diferensial mengamankan transformator ketika terjadi gangguan internal hubung singkat. Hasil perhitungan menunjukkan arus nominal pada sisi primer 150 kV adalah 230,94 A dan sisi sekunder 22 kV senilai 1574,59 A. Besar nilai *error mismatch* adalah 0,1955% pada sisi primer dan 0,2045% pada sisi sekunder, Arus sekunder CT (Arus primer) senilai 3,849 A dan (Arus sekunder) senilai 3,936 A. Arus rele diferensial sebesar 0,087 A dan arus penahan 3,8925 A. Nilai persentase slope₁ mencapai 2%, Nilai persentase slope₂ mencapai 4% dan arus setting relai senilai 0,0778 A. Hasil simulasi rele diferensial pada ETAP memperlihatkan bahwa saat gangguan internal terjadi pada Trafo 1, relay diferensial (Relay 1) bekerja memerintahkan CB1 dan CB4 untuk trip dalam waktu 60 ms. Hal yang sama terjadi pada Trafo 2, di mana Relay 2 memerintahkan CB2 dan CB3 untuk trip dengan delay yang sama. Sebaliknya, saat terjadi gangguan eksternal pada Bus 22 kV, relay diferensial tidak bekerja karena arus yang terdeteksi masih di bawah arus setting.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan simulasi yang telah dilakukan, disarankan agar pihak pengelola Gardu Induk Sirimau melakukan evaluasi berkala terhadap setting relay diferensial, terutama jika terjadi perubahan kapasitas beban atau penggantian peralatan, guna memastikan kinerja proteksi tetap optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ek Bien, L., & Helna, D. (2007). *Studi Penyetelan Relai Diferensial Pada Transformator Pt Chevron Pacific Indonesia*. Universitas Trisakti, Jakarta.
- [2] Farabi, S. M., & Putri, R. (2022). *Analisis Sistem Proteksi Differential Relay*. Universitas Malikussaleh Lhokseumawe, Muara Satu, Aceh Utara, Aceh.

- [3] Hayusman, L. M., Hidayat, T., & Saleh, C. (2017). *Pelatihan Software Etap (Electrical Transient Analyzer Program)*. Institut Teknologi Nasional Malang.
- [4] Hendratmoko, A., & Supardi, S. T. A. (2021). *Analisis Kinerja Proteksi Relai Diferensial Pada Transformator Daya Di Gardu Induk 150 kV Blora Menggunakan Software Etap 12.6*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [5] Irsyad, M. (2022). *Analisa Penentuan Setting Rele Diferensial Pada Transformator 60 MVA Gardu Induk 150 kV Kudus*. Universitas Islam Sultan Agung, Semarang.
- [6] Miftahul I., Ezwarsyah, Salahuddin, Andik B., Asri. (2024). *Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi Di Gardu Induk Langa*. Universitas Malikussaleh Lhokseumawe, Muara Satu, Aceh Utara, Aceh.
- [7] Muhammad, A. (2019). *Analisa Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya Gardu Induk Paya Pasir (Pt. Pln Persero)*. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan.
- [8] Nasution, E. S., Pasaribu, F. I., Arfianda, M. (2015). *Rele Diferensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya Pada Gardu Induk*. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan.
- [9] Pandawa, F. S. A., Tasmono, H., & Widagdo, R. S. (2023). *Studi Kasus Pengaturan Proteksi Rele Diferensial Transformator 1 Gardu Induk 150 kV Tanggul*. Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya.
- [10] Primawati, E. (2019). *Analisa Pengaturan Proteksi Rele Diferensial Pada Trafo III 60 MVA di Gardu Induk Banyudono 150KV/22KV*. Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [11] Tondok, Y. P., Patras, L. S., Lisi, F. (2019). *Perencanaan Transformator Distribusi 125 kVA*. Universitas Sam Ratulangi Manado.
- [12] Yuniarto, Subari, A., & Kusumastuti, D. H. (2015). *Setting Relay Diferensial Pada Gardu Induk Kaliwungu Guna Menghindari Kegagalan Proteksi*. Universitas Diponegoro, Semarang.
- [13] Yunus, M. Y., Tandioga, R., Sapruddin, A. F., & Dwi Putra, M. S. (2023). *Studi Penggunaan Relai Diferensial Sebagai Sistem Proteksi Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Barru*. Politeknik Negeri Ujung Pandang, Makassar.