

Proteksi Transformator Daya 260 MVA Menggunakan Rele Diferensial di PLTU Pangkalan Susu

Bagus Sujiwo¹⁾, Asri^{2*)}, Ezwarsyah³⁾, Selamat Meliala⁴⁾, Asran⁵⁾, Teuku Multazam⁶⁾

^{1, 2, 3, 4, 5, 6)}Program Studi Elektro Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe

Jl. Cot Tengku Nie Reuleut, Utara, Reuleut Timur, Aceh

*Corresponding author E-mail: asri@unimal.ac.id

ABSTRACT

Power transformers are the main components in the distribution of electrical energy to consumers, so they need to be protected from disturbances that can damage their performance. One of the main protections used is a differential relay, which works by comparing the incoming and outgoing currents of the transformer. At the Pangkalan Susu PLTU, a 260 MVA power transformer uses a differential relay made by Nanjing Nari Relay with a current setting of 0.26 A and an operating time of 0.048 seconds. This study is quantitative and uses data from a 260 MVA power transformer from the PLTU. The method used is differential relay setting analysis and simulation using ETAP 12.6.0 software. The CT ratio data used is 12,000:1 on the primary side and 1,000:1 on the secondary side, with a low mismatch error of 1.5079% at a voltage of 15.75 kV and 0.663158% at a voltage of 285 kV, still below the threshold of 5%. The simulation results show that the differential relay works optimally when an internal fault occurs in the protection zone, namely when the differential current exceeds the setting value. The relay will command the circuit breaker (CB) to open the circuit. Based on calculations and simulations, the optimal setting current obtained is 0.5352 A with a trip operation time of 0.020 seconds. This setting is expected to ensure that the transformer protection system works quickly and reliably in securing the system from internal faults.

Keywords: Power transformer, protection transformer, differential relay

ABSTRAK

Transformator daya merupakan komponen utama dalam penyaluran energi listrik ke konsumen, sehingga perlu dilindungi dari gangguan yang dapat merusak kinerjanya. Salah satu proteksi utama yang digunakan adalah rele diferensial, yang bekerja dengan membandingkan arus masuk dan keluar transformator. Pada PLTU Pangkalan Susu, transformator daya berkapasitas 260 MVA menggunakan rele diferensial buatan Nanjing Nari Relay dengan setting arus 0,26 A dan waktu operasi 0,048 detik. Penelitian ini bersifat kuantitatif dan menggunakan data transformator daya 260 MVA dari PLTU tersebut. Metode yang digunakan adalah analisis setting rele diferensial dan simulasi menggunakan software ETAP 12.6.0. Data rasio CT yang digunakan adalah 12.000:1 pada sisi primer dan 1.000:1 pada sisi sekunder, dengan mismatch error yang rendah yaitu 1,5079% pada tegangan 15,75 kV dan 0,663158% pada tegangan 285 kV, masih di bawah ambang batas 5%. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rele diferensial bekerja optimal saat terjadi gangguan internal dalam zona proteksi, yaitu saat arus diferensial melebihi nilai setting. Rele akan memerintahkan circuit breaker (CB) untuk membuka sirkuit. Berdasarkan perhitungan dan simulasi, arus setting optimal yang diperoleh adalah 0,5352 A dengan waktu operasi trip 0,020 detik. Setting ini diharapkan mampu memastikan sistem proteksi transformator bekerja secara cepat dan andal dalam mengamankan sistem dari gangguan internal.

Kata Kunci: Transformator daya, proteksi transformator, rele diferensial

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik menjadi salah satu kebutuhan pokok saat ini [1][2]. Transformator daya merupakan komponen utama dalam sistem tenaga listrik karena berperan untuk menyalurkan energi listrik dari generator pembangkit ke konsumen [3]. Transformator daya sering kali mengalami gangguan-gangguan selama pengoperasiannya, yang dapat mengganggu fungsi transformator [4]. Proteksi dan

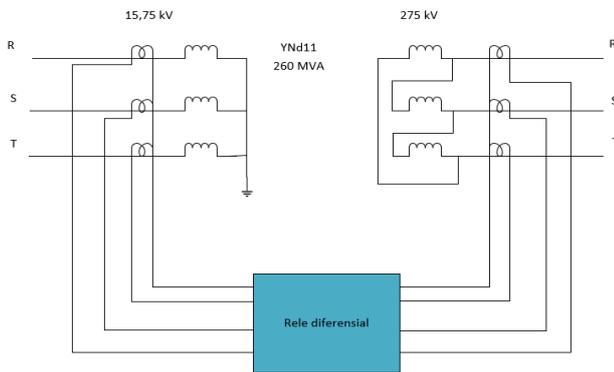
pengaturan diperlukan pada transformator daya dengan tujuan mencegah gangguan pada transformator daya selama beroperasi [5][6]. Salah satu proteksi yang paling penting pada transformator adalah rele differensial [7]. Rele differensial bekerja tanpa koordinasi yang lain [8]. Rele ini, berfungsi melindungi transformator daya dari gangguan internal [9]. Pada penelitian ini akan menganalisa resetting rele diferensial pada transformator daya 260 MVA di PLTU

Pangkalan Susu dan melakukan evaluasi simulasi rele diferensial terhadap gangguan eksternal dan internal menggunakan ETAP 12.6.0. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik operasi rele diferensial dan memastikan bahwa sistem proteksi mampu bekerja secara optimal dalam kondisi gangguan.

A. Rele Diferensial

Proteksi utama pada transformator adalah rele diferensial, yang berfungsi mendeteksi gangguan dengan respons secepat mungkin [10]. Namun, rele diferensial tidak dapat digunakan sebagai proteksi cadangan karena pemasangannya terbatas pada transformator arus di sisi *incoming* dan *outgoing* [11].

Prinsip kerja rele diferensial didasarkan pada perbedaan arus yang masuk dan keluar dari area yang dilindungi. Perbedaan ini berasal dari arus dua transformator arus (CT) yang terhubung ke rele [11]. Rele diferensial membutuhkan dua transformator arus yang dipasang di kedua sisi, yaitu sisi masuk dan sisi keluar area perlindungan [12]. Arus yang melewati transformator arus di sisi masuk kemudian dibandingkan dengan arus di sisi keluar untuk mendeteksi adanya gangguan [13].



Gambar 1. Rangkaian rele diferensial 3 fasa

II. METODE

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini akan ditunjukkan dalam diagram alir Gambar 2. Pada penelitian akan menganalisa setting rele diferensial dengan tujuan rele diferensial dapat memproteksi transformator daya dari gangguan internal dan akan melakukan simulasi untuk pengujian dari hasil perhitungan.

Penelitian dilakukan di PT. PLN Indonesia Power UBP Pangkalan Susu dan adapun data-data yang dibutuhkan untuk penelitian ini yaitu: single line diagram, data transformator daya, data rasio CT, data rele difernsial.

TABEL 1. DATA TRANSFORMATOR DAYA

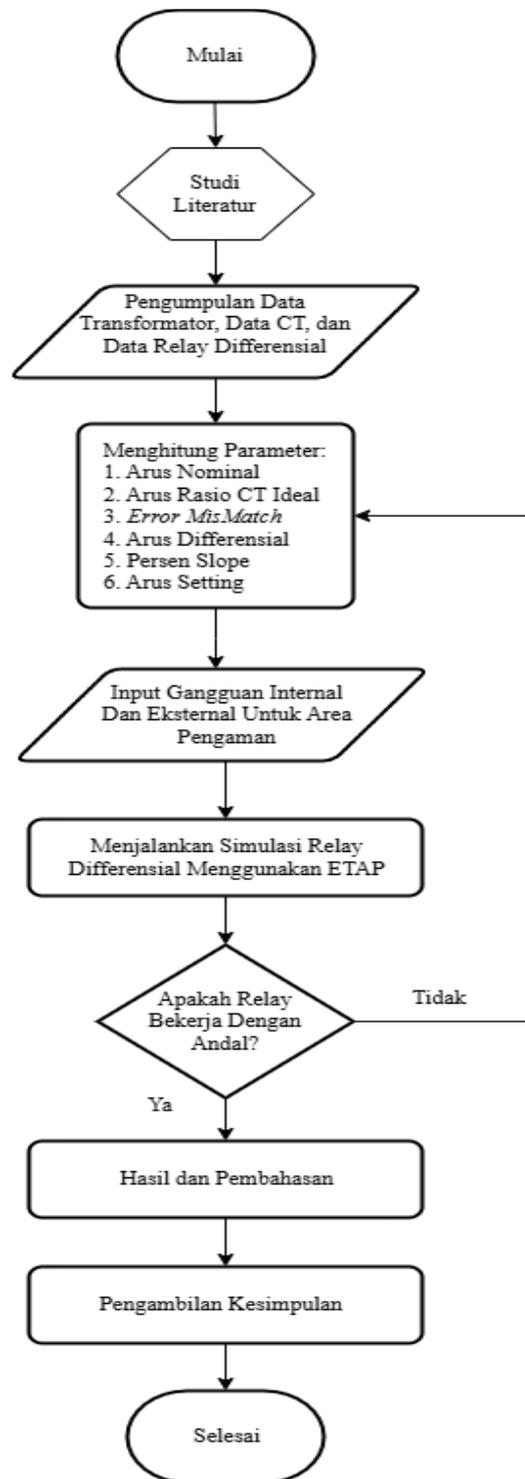
| Data | Spesifikasi |
|-------------------|-------------------------|
| Merek | TIANWEI BAObIAN (HEFEl) |
| Type GT | SFP-260000 / 330 |
| Serial No. | 201008072 |
| Rated Power | 260000 kVA |
| No. of Phase | 3 |
| Rated Frequency | 50 Hz |
| Service Condition | OUTDOORS |
| Rated Voltage | (300±2×2,5%)/15.75 kV |
| Connection Symbol | YNd11 |
| Type of Cooling | ODAF |
| Impedance Volatge | 14,28% |

TABEL 2. DATA RASIO CT

| Sisi Trafo | Rasio CT |
|------------|----------|
| 15,75 kV | 12000/5 |
| 285 kV | 1000/1 |

TABEL 3. DATA RELE DIFERENSIAL

| Data | Setting |
|----------------------------------|---------|
| Arus Pickup Percentage Diff GTU | 0.5 Ie |
| Arus Setting Percentage Diff GTU | 0.26 A |
| Time Operation Diff | 0.048 s |
| Slope 1 | 10 % |
| Slope 2 | 70 % |



Gambar 2. Digaram alir penelitian

A. Gangguan Pada Transformator Daya

Gangguan pada transformator adalah kondisi yang mengakibatkan trafo tidak dapat beroperasi sesuai dengan fungsi teknisnya. Gangguan ini biasanya ditandai dengan aktifnya alarm atau berfungsinya rele pengaman trafo (PMT trip), yang pada akhirnya menyebabkan terhentinya penyaluran tenaga listrik. Untuk menghitung arus gangguan di transformator dapat menggunakan persamaan berikut [14].

$$I_{f\ relay} = I_{f\ fault} \times \frac{1}{CT} \quad (1)$$

dimana :

$$\begin{aligned} I_{f\ relay} &= \text{Arus gangguan yang terbaca rele} \\ I_{f\ fault} &= \text{Arus pada saat terjadi gangguan} \\ CT &= \text{Rasio CT} \end{aligned}$$

B. Arus Diferensial

Arus Diferensial adalah selisih antara arus sekunder yang terukur oleh *Current Transformer* (CT) pada sisi primer dan sekunder dari transformator atau peralatan yang dilindungi [15][16][17]. Untuk menentukan arus diferensial dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$I_{Diff} = I_2 - I_1 \quad (2)$$

dimana :

$$\begin{aligned} I_{Diff} &= \text{Arus Diferensial} \\ I_2 &= \text{Arus Sekunder di CT}_2 \\ I_1 &= \text{Arus Sekunder di CT}_1 \end{aligned}$$

C. Arus Restrain

Arus *restrain* dapat diperoleh dengan cara menjumlahkan arus sekunder pada CT1 dan CT2 kemudian dibagi 2 [18][19][20].

$$I_{Restrain} = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (3)$$

dimana :

$$\begin{aligned} I_{Restrain} &= \text{Arus Restrain (penahan)} \\ I_2 &= \text{Arus Sekunder di CT}_2 \\ I_1 &= \text{Arus Sekunder di CT}_1 \end{aligned}$$

D. Arus Setting

Arus *setting* adalah nilai batas yang digunakan untuk menentukan apakah rele diferensial akan beroperasi atau tidak. Nilai ini dibandingkan dengan arus diferensial. Jika arus diferensial melebihi nilai arus *setting*, rele akan aktif dan memutus jaringan atau memerintahkan CB untuk terbuka (*trip*) dan sebaliknya bila tidak melebihi arus *setting* maka rele diferensial tidak akan beroperasi atau tidak akan memutus jaringan. Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung arus *setting* [4]:

$$I_{set} = \%Slope \times I_r \quad (4)$$

dimana :

$$\begin{aligned} I_{set} &= \text{Arus Setting Rele Diferensial} \\ \%Slope &= \text{Setting Keamanan} \\ I_r &= \text{Arus Restrain} \end{aligned}$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Rasio CT

Hasil dari perhitungan rasio CT pada transformator daya 260 MVA ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

TABEL 4. HASIL HITUNG RASIO CT 285 kV

| Hasil Hitung Rasio CT 285 kV | |
|------------------------------|--------------|
| Arus Nominal | 526,705509 A |
| Arus Rattng | 579,37606 A |
| Arus Sekunder CT | 0,5267 A |
| Rasio CT Ideal | 663,158 A |

TABEL 5. HASIL HITUNG RASIO CT 15,75 kV

| Hasil Hitung Rasio CT 15,75 kV | |
|--------------------------------|----------------|
| Arus Nominal | 9.530,86159 A |
| Arus Rattng | 10.483,9477 A |
| Arus Sekunder CT | 0,7943 A |
| Rasio CT Ideal | 18.095,23809 A |

Pada hasil hitung rasio CT dipilih rasio CT pada sisi tegangan tinggi adalah 1000 A dengan keluaran sebesar 1 A. Sementara itu, pada sisi tegangan rendah, digunakan CT dengan rasio 12.000 A dan pembacaan sebesar 1 A. Pemilihan rasio CT ini dipertimbangkan dengan arus *rattng* dan *error mismatch*, bahwa nilai rasio CT yang optimal adalah yang paling mendekati arus *rattng* dan tidak melebihi batas nilai *error mismatch*. Sehingga dipilih rasio CT yang di pasaran yaitu 12000:1 dikarenakan pada pasaran nilai arus sekunder CT hanya ada dua pilihan yaitu 1A dan 5A.

B. Analisis Arus Setting Rele Diferensial

TABEL 6. HASIL HITUNG ARUS SETTING RELE DIFERENSIAL

| Hasil Hitung Arus dan Setting Rele Diferensial | |
|--|----------|
| Arus Diferensial | 0,2676 A |
| Arus Restrain | 0,6605 A |
| % Slope 1 | 40,51 % |
| % Slope 2 | 81,029 % |
| Arus Setting | 0,5352 A |

Untuk menghitung nilai arus *setting* didapatkan dengan mengalikan nilai arus *restrain* dengan *percent slope 2* sehingga tujuan rele diferensial tidak akan bekerja terhadap gangguan *eksternal*.

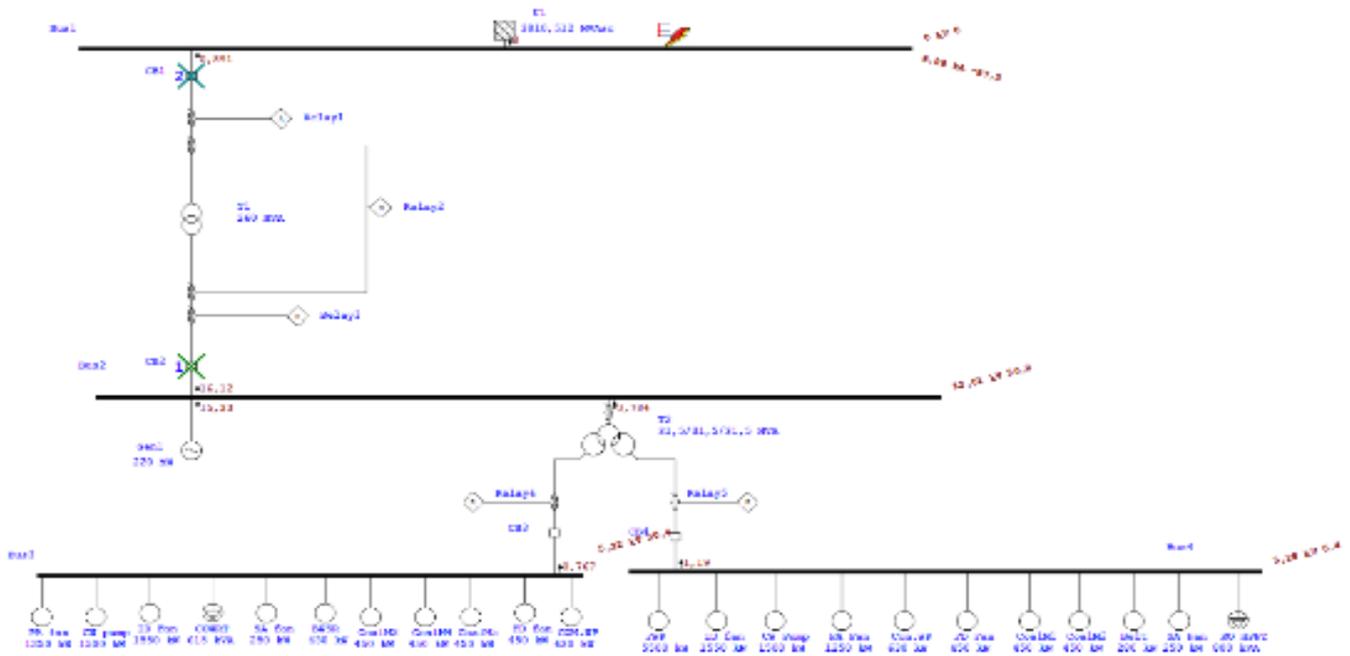
Hasil perhitungan menunjukkan bahwa arus sekunder pada sisi tegangan tinggi adalah sebesar 0,5267 A, sedangkan pada sisi tegangan rendah adalah 0,7943 A. Selisih antara kedua arus sekunder ini digunakan untuk menentukan arus diferensial, yang dalam perhitungan diperoleh sebesar 0,2676 A.

C. Evaluasi Simulasi Rele Diferensial

Pada evaluasi dilaksanakan dengan simulasi ETAP 12.6.0 untuk melihat kinerja rele diferensial dan melihat besar arus gangguan.

1. Kondisi Gangguan Eksternal

Berikut merupakan *single line diagram* transformator daya yang berkapasitas 260 MVA diproteksi menggunakan rele diferensial dan OCR (*Over Current Relay*) yang terletak pada sisi primer dan sisi sekunder untuk memberikan gambaran kinerja rele diferensial serta untuk menghitung arus diferensial selama kondisi gangguan eksternal. Simulasi ini menunjukkan respons sistem proteksi terhadap gangguan eksternal, sehingga dapat memberikan pemahaman mengenai performa dan tingkat keandalan sistem secara menyeluruh.



Gambar 3. Simulasi gangguan eksternal sisi 275 kV

Sequence-of-Operation Events - Output Report: 2

3-Phase (Symmetrical) fault on bus: Bus1

Data Rev.: Base Config: Normal Date: 05-18-2025

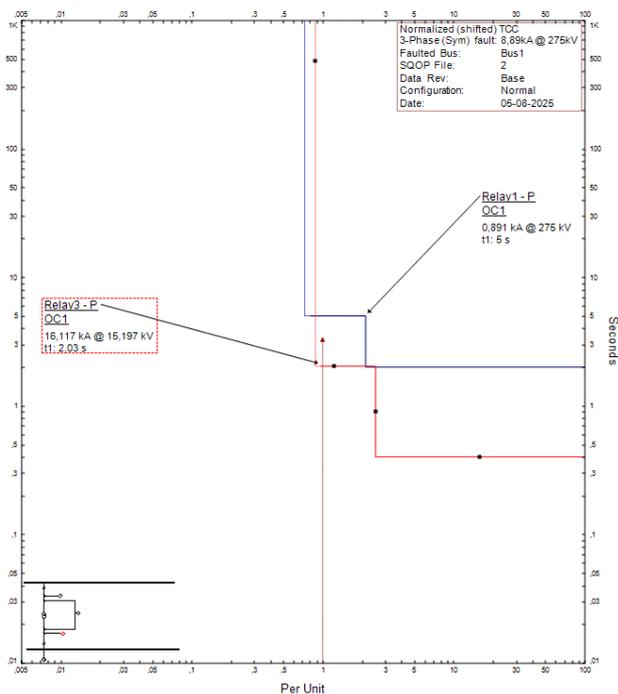
| Time (ms) | ID | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition |
|-----------|--------|---------|---------|---------|------------------------------------|
| 2030 | Relay3 | 16,117 | 2030 | | Phase - OC1 - 51 |
| 2040 | CB2 | | 10,0 | | Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 51 |
| 5000 | Relay1 | 0,891 | 5000 | | Phase - OC1 - 51 |
| 5010 | CB1 | | 10,0 | | Tripped by Relay1 Phase - OC1 - 51 |

Gambar 4. Output report simulasi gangguan eksternal sisi 275 kV

Berdasarkan hasil simulasi Gambar 3 dan Gambar 4, rele diferensial tidak beroperasi dikarenakan gangguan diluar area pengaman gangguan berada di bus 275 kV yang beroperasi hanya rele *over current*.

Berdasarkan gambar kurva tersebut dapat dilihat bahwa bagian transformator daya pada rele 1 gangguan yang terjadi adalah sebesar 891 A pada sisi 275 kV, dan waktu yang dibutuhkan untuk relay beroperasi membuka CB adalah 5 detik. Pada rele 3 arus gangguan yang terukur adalah sebesar 16.117 A di sisi 15,197 kV, dan waktu yang dibutuhkan untuk rele beroperasi membuka CB adalah 2,03 detik. Pada keadaan ini yang dengan gambar kurva diatas rele 3 terlebih dahulu beroperasi kemudian rele 1 beroperasi dan rele diferensial atau dengan kode rele 2 tidak beroperasi memproteksi gangguan dikarenakan bukan tempat di area pengamanannya.

Untuk mengetahui arus diferensial yang terukur dapat dihitung sebagai berikut.



Gambar 5. Kurva karakteristik gangguan eksternal sisi 275 kV

$$I_{f2 \text{ relay}} = I_{2 \text{ fault}} \times \frac{1}{CT_2}$$

$$I_{f2 \text{ relay}} = 893 \times \frac{1}{1000}$$

$$I_{f2 \text{ relay}} = 0,891 \text{ A}$$

$$I_{f1 \text{ relay}} = I_{1 \text{ fault}} \times \frac{1}{CT_1}$$

$$I_{f1 \text{ relay}} = 16.117 \times \frac{1}{12000}$$

$$I_{f1 \text{ relay}} = 1,343 \text{ A}$$

$$I_{diff} = |I_2 - I_1|$$

$$I_{diff} = |0,891 - 1,343|$$

$$I_{diff} = 0,452 \text{ A}$$

$$I_{restarin} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

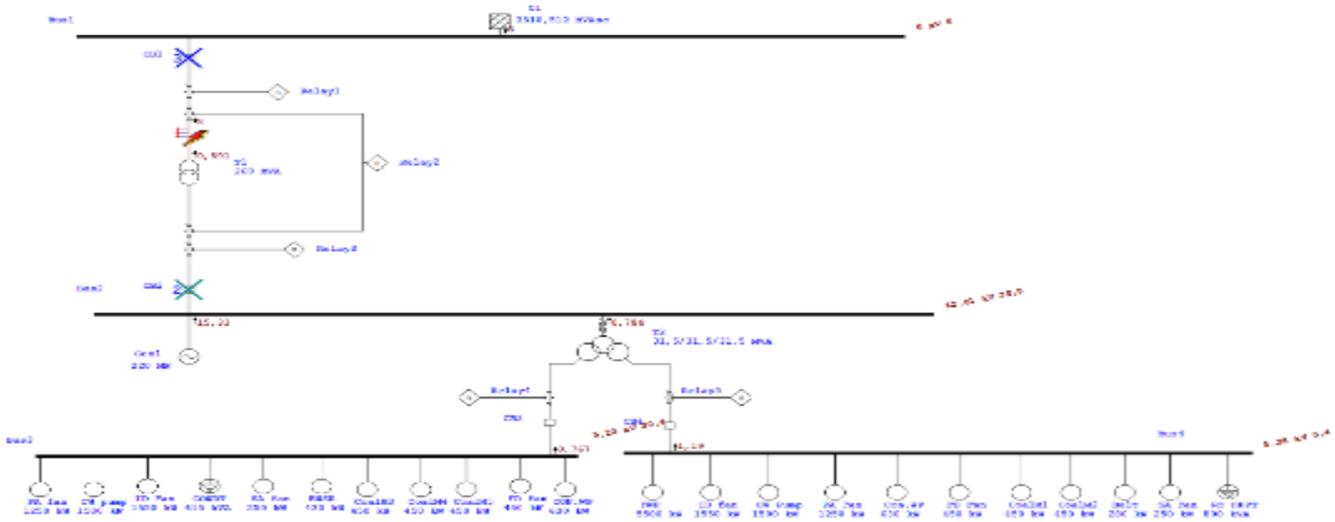
$$I_{restarin} = \frac{0,891 + 1,343}{2}$$

$$I_{restarin} = 1,117 \text{ A}$$

2. Kondisi Gangguan Internal

Berikut merupakan *single line diagram* dengan rele proteksi untuk memberikan gambaran kinerja rele diferensial

serta untuk menghitung arus diferensial selama kondisi gangguan *internal*.



Gambar 6. Simulasi gangguan *internal* sisi sekunder transformator daya

Sequence-of-Operation Events - Output Report: 2

3-Phase (Symmetrical) fault on connector between CT2 & T1. Adjacent bus: Bus1

Data Rev.: Base Config: Normal Date: 05-08-2025

| Time (ms) | ID | If (kA) | T1 (ms) | T2 (ms) | Condition |
|-----------|--------|---------|---------|---------|------------------------------------|
| 20,0 | Relay2 | | 20,0 | | Phase - 87 |
| 30,0 | CB1 | | 10,0 | | Tripped by Relay2 Phase - 87 |
| 30,0 | CB2 | | 10,0 | | Tripped by Relay2 Phase - 87 |
| 2000 | Relay1 | 8 | 2000 | | Phase - OC1 - 50 |
| 2010 | CB1 | | 10,0 | | Tripped by Relay1 Phase - OC1 - 50 |
| 2030 | Relay3 | 16,117 | 2030 | | Phase - OC1 - 51 |
| 2040 | CB2 | | 10,0 | | Tripped by Relay3 Phase - OC1 - 51 |

Gambar 7. *Output report* simulasi gangguan *internal* sisi sekunder transformator daya

Berdasarkan hasil simulasi Gambar 6 Gambar 7 rele diferensial beroperasi dikarenakan gangguan berada di area pengaman gangguan berada di sisi sekunder transformator

Berdasarkan pada gambar kurva diatas dapat dilihat bahwa di bagian transformator daya pada rele 1 terukur arus gangguan sebesar 8 A pada sisi 275 kV dan waktu yang dibutuhkan oleh rele 1 untuk membuka CB adalah 2 detik. Pada rele 3 terukur arus gangguannya sebesar 16.117 A dan waktu yang dibutuhkan oleh rele 3 untuk membuka CB adalah 2,03 detik. Pada keadaan ini Rele diferensial beroperasi terlebih dahulu untuk memproteksi gangguan internal, serta di back up oleh proteksi lain yaitu OCR dengan kode rele 1 dan rele 3.

Untuk melihat berapa besar arus gangguan rele diferensial nya dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$I_{f2 \text{ relay}} = I_2 \text{ fault} \times \frac{1}{CT_2}$$

$$I_{f2 \text{ relay}} = 8 \times \frac{1}{1000}$$

$$I_{f2 \text{ relay}} = 8 \text{ A}$$

$$I_{f1 \text{ relay}} = I_1 \text{ fault} \times \frac{1}{CT_1}$$

$$I_{f1 \text{ relay}} = 16.117 \times \frac{1}{12000}$$

$$I_{f1 \text{ relay}} = 1,343 \text{ A}$$

$$I_{diff} = |I_2 - I_1|$$

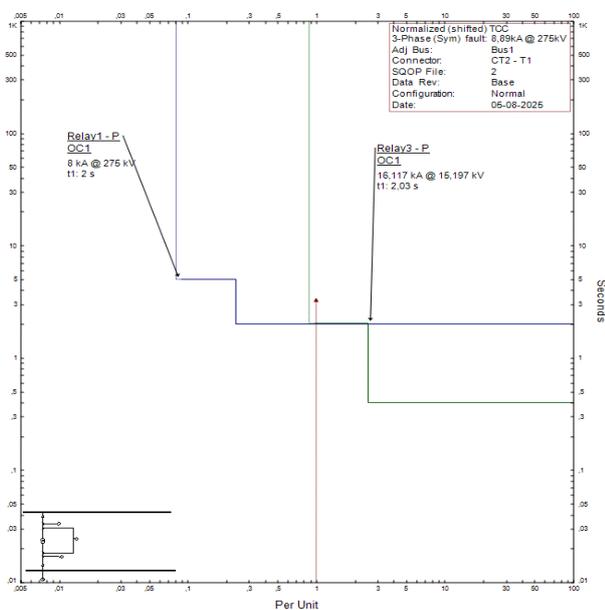
$$I_{diff} = |8 - 1,343|$$

$$I_{diff} = 6,657 \text{ A}$$

$$I_{restarin} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

$$I_{restarin} = \frac{1,343 + 8}{2}$$

$$I_{restarin} = 4,67 \text{ A}$$



Gambar 8. Kurva simulasi gangguan internal sisi sekunder transformator daya

Pada simulasi rele diferensial beroperasi dengan waktu 0,020 detik rele tersebut beroperasi dikarenakan adanya gangguan di area internal transformator daya yaitu gangguan antara CT dan transformator serta arus diferensial yang sangat tinggi yaitu 8 A nilai tersebut sudah melebihi dari arus *setting* yang sudah di analisa.

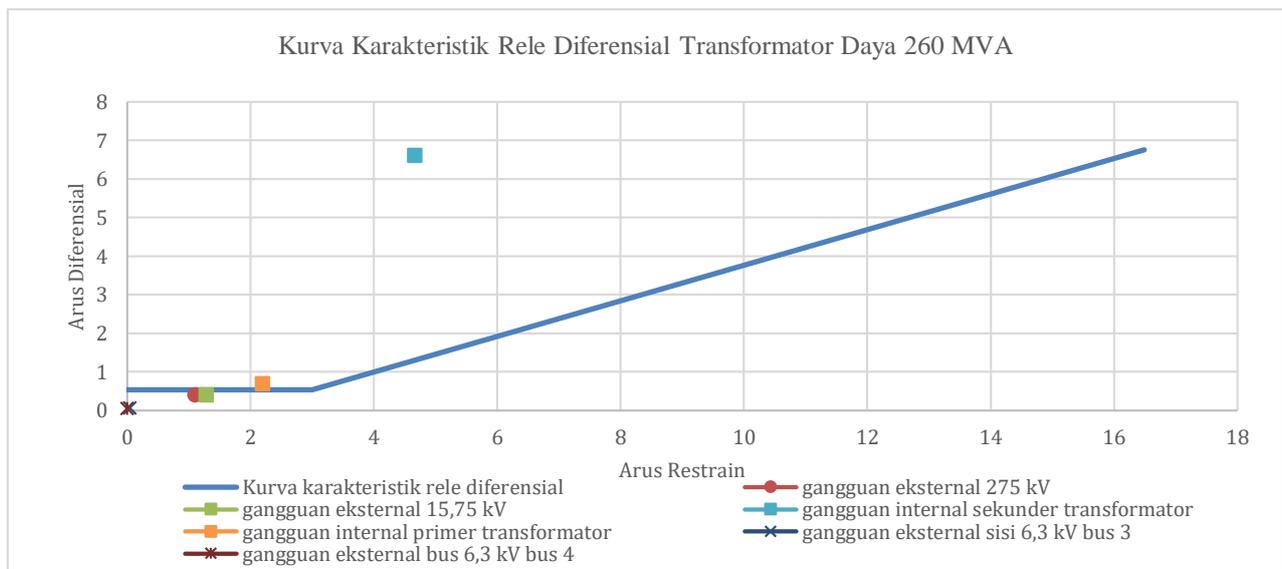
D. Hasil Simulasi

Pembahasan ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja rele diferensial serta waktu respon ketika terjadi gangguan, baik gangguan internal maupun eksternal. Berdasarkan perhitungan arus diferensial normal dan gangguan di luar area pengamanan (*eksternal*) 3 fasa dapat diketahui :

- I_{diff} terbesar adalah 0,52 A
- $I_{restrain}$ terbesar adalah 1,284 A

Rele diferensial tidak boleh bekerja saat kondisi normal maupun ketika terjadi gangguan di luar zona pengamanan rele (*eksternal*). Pada hasil simulasi rele diferensial arus diferensial yang sudah dihitung tidak melebihi dari arus *setting* yang sudah dihitung yang dimana nilai dari arus setting untuk rele diferensial adalah 0,5352. Oleh karena itu, rekomendasi setting berdasarkan perhitungan dan simulasi adalah $I_{sett} = 0,5352$.

Perlu dipahami bahwa dalam kondisi gangguan eksternal, rele diferensial tidak akan bekerja. Pada situasi semacam ini, perlindungan terhadap gangguan ditangani oleh OCR (*Over Current Relay*), yang berfungsi untuk mendeteksi gangguan di luar zona proteksi rele diferensial dan memberikan perintah kepada pemutus sirkuit (CB) untuk melakukan pemutusan (*trip*) ketika gangguan tersebut terjadi.



Gambar 9. Kurva karakteristik rele diferensial transformator daya 260 MVA

TABEL 7. HASIL SIMULASI DAN PERHITUNGAN UNTUK PENGUJIAN SETTING RELE DIFERENSIAL KETIKA TERJADI GANGGUAN KELISTRIKAN

| Jenis Gangguan | I_{diff} (A) | $I_{restrain}$ (A) | Keterangan |
|--|----------------|--------------------|------------------|
| Gangguan eksternal sisi 275 kV | 0,452 | 1,117 | Tidak beroperasi |
| Gangguan eksternal sisi 15,75 kV | 0,52 | 1,284 | Tidak beroperasi |
| Gangguan eksternal sisi 6,3 kV bus 3 | 0,0606 | 0,41 | Tidak beroperasi |
| Gangguan eksternal sisi 6,3 kV bus 4 | 0,0372 | 0,092 | Tidak Beroperasi |
| Gangguan Internal sisi sekunder transformator daya | 6,657 | 4,67 | Beroperasi |
| Gangguan Internal sisi primer transformator daya | 0,6965 | 2,205 | Beroperasi |

Pada gambar kurva diatas dapat dilihat bahwa rele diferensial beroperasi hanya pada saat terjadi gangguan internal di area transformator daya 260 MVA dan tidak bekerja pada saat gangguan eksternal.

Pada gambar kurva area yang melewati kurva karakteristik rele diferensial adalah rele diferensial yang beroperasi untuk memproteksi gangguan. Gangguan yang

di proteksi oleh rele diferensial sesuai dari gambar kurva hanya pada saat terjadi gangguan *internal* dan tidak memproteksi gangguan *eksternal*.

Pada hasil perhitungan arus diferensial saat simulasi gangguan arus diferensial yang melebihi arus *setting* dari hasil perhitungan hanya pada saat terjadi gangguan internal dan arus diferensial pada saat gangguan eksternal tidak

melebihi dari arus setting yaitu 0,5352 A. Oleh karena itu, pemilihan setting tersebut sudah sesuai dan bisa di aplikasikan ke differential rele transformer (87T).

TABEL 8. PERBANDINGAN DATA ARUS SETTING DAN WAKTU OPERASI

| Perbandingan Data arus setting dan waktu operasi | | |
|--|------------------|-------------------|
| Data | Arus Setting (A) | Waktu Operasi (s) |
| Eksisting | 0,26 | 0,048 |
| Perhitungan dan Simulasi | 0,5352 | 0,020 |

Pada data lapangan (Eksisting) di dapatkan nilai arus setting 0,26 A dengan waktu operasi rele yaitu 0,048 detik. Pada data simulasi didapatkan nilai arus setting sebesar 0,5352 A nilai tersebut didapatkan dari hasil perhitungan dengan waktu operasi rele pada hasil simulasi gangguan internal yaitu 0,020 detik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis perhitungan dan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0, penelitian ini menunjukkan bahwa rele diferensial memiliki kinerja proteksi yang andal dan selektif dalam mendeteksi serta merespons gangguan internal pada transformator daya 260 MVA di PLTU Pangkalan Susu, dengan nilai arus setting sebesar 0,5352 A dan waktu operasi 0,020 detik, yang terbukti lebih cepat dibandingkan kondisi *eksisting* di lapangan. Rele tidak merespons gangguan *eksternal* di luar zona proteksi, sehingga menunjukkan kesesuaian pengaturan serta efektivitas sistem proteksi yang diterapkan. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar dilakukan validasi hasil simulasi dengan data empiris dari pengujian lapangan guna memperkuat akurasi model, serta menambahkan kajian perbandingan terhadap metode proteksi lainnya.

REFERENSI

[1] M. Ilma, Ezwarsyah, Salahuddin, A. Bintoro, and Asri, "Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi Gangguan Transformator Daya 60 MVA di Gardu Induk Langsa," *J. Energi Elektr.*, vol. 13, no. 1, pp. 53–59, 2024.

[2] A. Srinaldi, Muliadi, syukri, M. R. Azmi, and Husaini, "Proteksi Jaringan Transmisi Saluran Udara dengan Menggunakan Relay Jarak," *Aceh J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 6–11, 2021.

[3] 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.

[4] Y. T. Laksono, "Evaluasi Setting Rele Proteksi Diferensial pada Generator Unit 2 PLTP Kamojang POMU menggunakan Simulasi ETAP," *Fti*, pp. 1–12, 2022, [Online]. Available: <https://eproceeding.itenas.ac.id/index.php/fti/article/view/938>

[5] 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.

[6] M. I. Syukri, "Analisis Koordinasi Proteksi Overcurrent Relay Gangguan Fasa Pada Penyulang NG-02 Peunaga Meulaboh," vol. 4, 2024.

[7] N. R. Fitriani, "Analisis penggunaan rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya 16 mva di gardu induk jajar," *Publ. Ilm. Progr. Stud. Tek. ELEKTRO Fak. Tek. Univ. MUHAMMADIYAH SURAKARTA 2017*, 2017.

[8] L. Ek Bien and D. Helna, "Studi Penyetelan Relai Diferensial Pada Transformator Pt Chevron Pacific Indonesia," *JETri*, vol. 6, no. 2, pp. 41–68, 2007.

[9] Ferdiansyah, "Studi Penggunaan Rele Diferensial Type P642 Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya 30 Mva Gardu Induk Panton Labu Pt. Pln (Persero) Aceh Utara," *J. Tektro*, vol. 7, no. 1, pp. 78–83, 2023.

[10] C. J. Saputra and S. T. A. Supardi, "Studi Setting Rele Differential Pada Transformator Tenaga Di PT Pertamina Refinery Unit IV Cilacap," 2018.

[11] M. R. Muharam, "Analisis Performa Relay Diferensial," *Anal. Performa Relay Differ. Transform. Pada Gardu Induk Cilegon Lama*, vol. 025, p. 41, 2018.

[12] S. W. Simbolon, M. Aditya, S. M. Siagian, T. Listrik, T. Elektro, and P. N. Medan, "Transformator Daya Di Pt Pln Nusantara Power Updk," pp. 453–464, 2023.

[13] K. Rele, D. Dan, B. Santosa, M. N. Qosim, and H. Husada, "Arus Lebih 51 / 27 Di Generator-Transformator Terhadap," vol. 5, no. 1, pp. 37–43, 2015.

[14] T. Kv and T. Gangguan, "PADA," vol. 12, no. 3, pp. 1–10, 2024.

[15] D. Wijanarko, "Analisa Penggunaan Rele Diferensial Sebagai Proteksi Pada Transformator 60 MVA Di Gardu Induk Palur," 2018.

[16] D. Eka Kusuma and I. Akbar Darmawan, "Perbandingan Setting Matematis Rele Diferensial Transformator Daya Dengan Setting GI 150KV Cilegon Baru PT. PLN (Persero) ULTG Cilegon," *J. Elektron. dan Tek. Inform. Ter. JENTIK*), vol. 2, no. 2, pp. 24–38, 2024.

[17] E. S. Nasution et al., "Rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya pada gardu induk," pp. 179–186, 2015.

[18] Yuniarto, A. Subari, and D. H. Kusumastuti, "Setting Relay Diferensial Pada Gardu Induk Kaliwungu Guna Menghindari Kegagalan Proteksi," *Transmisi*, vol. 17, no. 3, pp. 147–152–152, 2015.

[19] Z. Zulkarnaini and F. Hafni, "Studi Analisa Rele Diferensial Pada Proteksi Transformator 60 MVA Gardu Induk Pauh Limo," *J. Tek. Elektro*, vol. 9, no. 2, pp. 79–86, 2020.

[20] J. M. Tambunan and A. P. Winata, "Tinjauan Kinerja Relay Diferensial Gt 322.1 Mta Unit 2.1 Pltgu Muara Karang," *TESLA J. Tek. Elektro*, vol. 22, no. 1, p. 80, 2020.