

Analisis Kinerja Relai Diferensial Pada Transformator Daya 60 MVA Gardu Induk Sanggrahan

Muhammad Hafizh Haqiqi*, Agung Trihasto, Andriyatna Agung Kurniawan, Muhammad Syukron

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Tidar
Jl. Kapten Suparman No.39, Potrobangsari, Kec. Magelang Utara, Kota Magelang, Jawa Tengah 56116
E-mail: muhammad.hafizh.haqiqi@students.untidar.ac.id

Naskah Masuk: 04 Agustus 2026; Diterima: 22 September 2026; Terbit: 30 September 2026

ABSTRAK

Abstrak - Transformator daya merupakan peralatan utama dalam sistem tenaga listrik yang memerlukan sistem proteksi yang andal untuk menjaga kontinuitas dan keamanan penyaluran energi listrik. Pada transformator daya 60 MVA Unit 4 Gardu Induk 150 kV Sanggrahan, hasil asesmen *Through Fault Current* (TFC) menunjukkan kondisi waspada sehingga diperlukan evaluasi terhadap kinerja relai diferensial sebagai proteksi utama transformator. Penelitian ini bertujuan menganalisis kinerja relai diferensial melalui perbandingan antara *setting* eksisting dan *setting* hasil perhitungan teoritis menggunakan perangkat lunak ETAP 21.0.1. Metode penelitian meliputi perhitungan parameter *setting* relai diferensial berdasarkan data teknis transformator dan CT serta simulasi kondisi normal, gangguan di dalam zona proteksi, dan gangguan di luar zona proteksi menggunakan ETAP 21.0.1. Hasil perhitungan teoritis diperoleh nilai arus *setting* sebesar 0,0962 A, arus restrain 0,8179 A, *Slope* 1 sebesar 11,76%, dan *Slope* 2 sebesar 23,52%, sedangkan *setting* eksisting yang digunakan pada relai diferensial yaitu arus *setting* sebesar 0,3 A, arus restrain sebesar 4 A, *Slope* 1 sebesar 30%, dan *Slope* 2 sebesar 80%. Hasil simulasi menunjukkan kedua *setting* relai diferensial bekerja pada seluruh gangguan di dalam zona proteksi berupa hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah, serta tetap stabil pada kondisi normal maupun gangguan di luar zona proteksi. Perbedaan nilai *setting* tersebut disebabkan oleh pertimbangan kondisi aktual sistem, seperti arus inrush, arus eksitasi transformator, kesalahan CT, kesalahan sadapan, *mismatch*, dan faktor keamanan sesuai standar PLN. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *setting* relai diferensial eksisting yang digunakan telah mampu memberikan proteksi yang baik terhadap transformator daya.

Kata kunci: Transformator Daya, Proteksi, Relai Diferensial, ETAP 21.0.1

ABSTRACT

Abstract - Power transformers are the main equipment in the electric power system that requires a reliable protection system to maintain the continuity and security of electrical energy distribution. In the 60 MVA power transformer of Unit 4 of the 150 kV Sanggrahan Substation, the results of the *Through Fault Current* (TFC) assessment indicate an alert condition so that an evaluation of the performance of the differential relay as the main protection of the transformer is needed. This study aims to analyze the performance of the differential relay through a comparison between the existing settings and the settings of the theoretical calculation results using ETAP 21.0.1 software. The research method includes calculating the differential relay setting parameters based on the technical data of the transformer and CT as well as simulating normal conditions, faults within the protection zone, and faults outside the protection zone using ETAP 21.0.1. The theoretical calculation results obtained a setting current value of 0.0962 A, a restraint current of 0.8179 A, a *Slope* 1 of 11.76%, and a *Slope* 2 of 23.52%, while the existing settings used in the differential relay are a setting current of 0.3 A, a restraint current of 4 A, a *Slope* 1 of 30%, and a *Slope* 2 of 80%. The simulation results show that both differential relay settings work on all faults within the protection zone in the form of three-phase, two-phase, and one-phase to ground short circuits, and remain stable under normal conditions and faults outside the protection zone. The difference in setting values is caused by consideration of actual system conditions, such as inrush current, transformer excitation current, CT error, tapping error, CT mismatch, and a safety factor according to PLN standards. The simulation results show that the existing differential relay settings used have been able to provide good protection to power transformers.

Keywords: Power Transformer, Protection, Differential Relay, ETAP 21.0.1

Copyright © 2026 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Dalam sistem tenaga listrik, transformator daya berperan sebagai komponen utama terutama untuk menyalurkan energi listrik dan pengaturan tegangan. Keandalan dalam penyaluran energi listrik sangat dipengaruhi oleh penggunaan transformator sebagai komponen utamanya [1]. Sistem proteksi berfungsi untuk mengisolasi gangguan yang dapat menyebabkan perluasan daerah gangguan dan mengganggu keandalan dalam penyaluran energi Listrik [2][3]. Berdasarkan IEEE C37.91-2021 transformator daya diatas 10 MVA harus dilengkapi relai diferensial sebagai proteksi utamanya [4]. Oleh karena itu, transformator daya dilengkapi dengan relai diferensial sebagai sistem proteksi utama yang dirancang untuk bekerja secara cepat dan selektif dalam mendeteksi gangguan internal berdasarkan perbedaan arus antara sisi primer dan sisi sekunder transformator[5]. Kinerja relai diferensial sangat dipengaruhi oleh keakuratan rasio transformator arus (CT), kesalahan ketidakcocokan (*mismatch*), arus diferensial, dan arus penahan (*restraining current*) [6].

Through Fault Current (TFC) adalah arus gangguan yang bersumber dari jaringan pada sisi sekunder transformator [7][8]. Arus TFC yang mengalir berulang atau dalam durasi tertentu dapat menimbulkan efek kumulatif berupa tekanan termal dan mekanis, yang pada akhirnya berpotensi menyebabkan penurunan keandalan hingga kegagalan transformator [9]. Hasil asesmen yang dilakukan oleh PT. PLN (Persero) terhadap TFC pada Transformator Unit 4 di Gardu Induk 150 kV Sanggrahan menunjukkan bahwa Transformator Unit 4 termasuk dalam kategori kondisi “Waspada”, yang berarti transformator mengalami tingkat tekanan gangguan (*fault stress*) lebih tinggi dari batas aman dan berpotensi mempercepat degradasi isolasi.

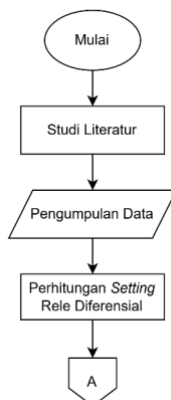
Penelitian yang dilakukan oleh ilma didapatkan nilai arus *setting* diferensial hasil perhitungan sebesar 0,1159 A sedangkan nilai *setting* relai eksisting sebesar 0,3 A [10]. Penelitian lain juga didapatkan selisih hasil *setting* yaitu pada nilai perhitungan arus *setting* diferensial diperoleh sebesar 0,481 A dan pada *setting* relai diferensial eksisting adalah 0,5 A [11]. Perbedaan antara *setting* hasil perhitungan teoritis dan *setting* eksisting juga ditemukan pada beberapa penelitian lainnya, baik pada parameter arus *setting*, arus restrain, *slope* 1, maupun *slope* 2 [12][13][14].

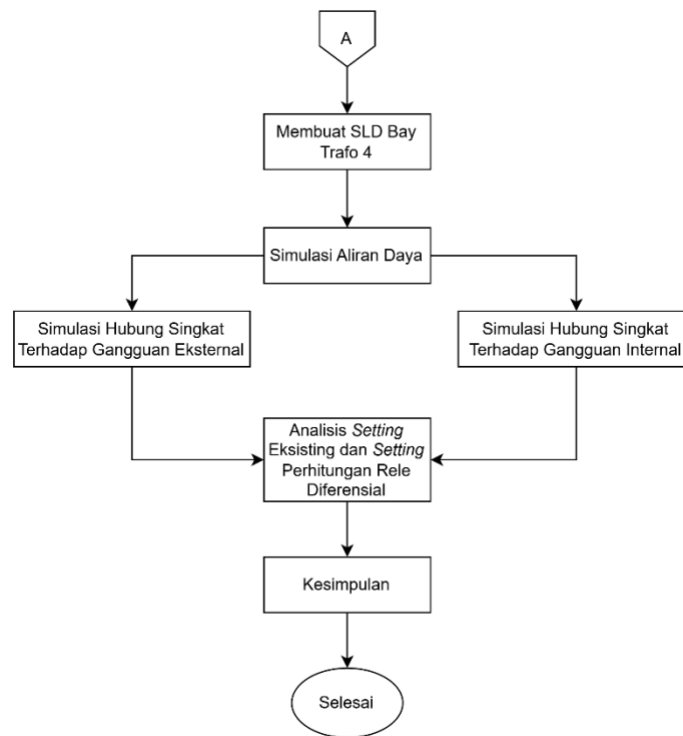
Permasalahan utama yang diidentifikasi dalam penelitian ini adalah adanya perbedaan antara *setting* relai diferensial eksisting dan *setting* hasil perhitungan teoritis. Selain itu, kondisi “waspada” berdasarkan asesmen *Through Fault Current* (TFC) pada transformator daya 60 MVA di Gardu Induk 150 kV Sanggrahan menjadi salah satu alasan penting dilakukannya penelitian ini. Penelitian yang membandingkan secara mendalam *setting* relai diferensial eksisting di lapangan dengan *setting* hasil perhitungan teoritis, kemudian memvalidasi keduanya melalui simulasi menggunakan perangkat lunak analisis sistem tenaga untuk mengevaluasi kinerja dan kesesuaiannya terhadap berbagai kondisi gangguan, masih terbatas.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan kedua *setting* tersebut guna mengetahui kinerja serta kesesuaian *setting* relai diferensial dalam melindungi transformator daya. Dengan demikian, penelitian ini memberikan temuan berbasis studi kasus pada Trafo 4 GI 150 kV Sanggrahan mengenai kesesuaian *setting* relai diferensial terhadap karakteristik gangguan dan kondisi TFC yang teridentifikasi. Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya menjadi bahan evaluasi terhadap kinerja dan keandalan sistem proteksi pada Trafo 4, tetapi juga dapat menjadi referensi awal dalam melakukan evaluasi *setting* relai diferensial pada transformator lain yang memiliki kondisi TFC serupa.

2. METODE PENELITIAN

Pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis berbasis simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 21.0.1. Tahapan penelitian yang dilakukan diperlihatkan pada Gambar 1 berikut:





Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Analisis dilakukan dengan melakukan perhitungan nilai *setting* pada relai diferensial yang digunakan sebagai proteksi transformator daya. Perhitungan ini dilaksanakan untuk menentukan besarnya nilai pengaturan relai berdasarkan data yang telah dikumpulkan, sehingga dapat diketahui nilai *setting* secara teoritis dan dijadikan acuan dalam menganalisis kinerja relai. Berikut adalah tahap perhitungan *setting* relai diferensial secara teori:

1. Perhitungan Arus Nominal

Arus nominal transformator dihitung berdasarkan kapasitas daya transformator dan tegangan nominal menggunakan Persamaan 1.

$$I_N = \frac{S}{\sqrt{3} V} \quad (1)$$

2. Perhitungan Arus *Rating*

Arus rating relai diferensial ditentukan sebesar 110% dari arus nominal transformator sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$I_{rating} = 110\% \times I_N \quad (2)$$

3. Perhitungan *Error Mismatch*

Nilai *error mismatch* antara transformator arus (CT) ideal dan CT terpasang dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$Error\ Mismatch = \frac{CT\ ideal}{CT\ Terpasang} \times \% \quad (3)$$

4. Perhitungan Nilai Arus Sekunder CT

Arus sekunder pada masing-masing CT dihitung berdasarkan rasio CT dan arus nominal primer menggunakan Persamaan 4.

$$I_{sekunder} = \frac{1}{Rasio\ CT} \times I_N \quad (4)$$

5. Perhitungan Arus Diferensial

Arus diferensial diperoleh dari selisih mutlak arus sekunder CT pada kedua sisi transformator sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 5.

$$I_{diff} = |i1 - i2| \quad (5)$$

6. Perhitungan Nilai Arus *Restrain*

Arus *restrain* dihitung sebagai nilai rata-rata arus sekunder CT dari kedua sisi transformator menggunakan Persamaan 6.

$$I_{restrain} = \frac{i1+i2}{2} \quad (6)$$

7. Perhitungan *Percent Slope*

Nilai *slope* digunakan sebagai karakteristik kerja relai diferensial dan dihitung berdasarkan perbandingan arus diferensial terhadap arus restrain seperti pada Persamaan 7 dan Persamaan 8.

$$Slope\ 1 = \frac{I_{diff}}{I_{restrain}} \times 100\% \quad (7)$$

$$Slope\ 2 = \left(\frac{I_{diff}}{I_{restrain}} \times 2 \right) \times 100\% \quad (8)$$

8. Perhitungan Nilai Arus *Setting*

Nilai arus *setting* relai diferensial ditentukan berdasarkan nilai *slope* yang digunakan dan arus restrain sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 9.

$$I_{setting} = \%slope\ 1 \times I_{restrain} \quad (9)$$

Langkah selanjutnya setelah menentukan nilai *setting* secara perhitungan teoritis hal selanjutnya yang dilakukan adalah melakukan simulasi gangguan hubung singkat menggunakan perangkat lunak ETAP 21.0.1 dan analisis *setting* relai diferensial berdasarkan arus hubung singkat hasil simulasi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Data

Data Transformator Daya Unit 4 GI 150 kV Sanggrahan yang diperoleh dari *nameplate* transformator diperlihatkan pada Tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi Transformator Daya

No.	Parameter	Nilai
1.	Merk/Tipe	UNINDO
2.	Tahun Pembuatan	2007
3.	No. Serial	P060LEC492-08
4.	Kapasitas Trafo	60 MVA
5.	Tegangan Sisi Primer	150 kV
6.	Tegangan Sisi Sekunder	20 kV
7.	Impedansi	12,12 %
8.	Frekuensi	50 Hz
9.	Sambungan	Yyn0
10.	Standar	IEC 60076
11.	Minyak	Mineral Oil
12.	Pendingin	ONAN/ONAF

Rasio Transformator Arus (CT) pada sisi 150 kV dan sisi 20 kV ditunjukkan pada Tabel 2 sebagai berikut:

Tabel 2. Rasio *Current Transformer* (CT)

Sisi 150 kV		Sisi 20 kV	
Primer	Sekunder	Primer	Sekunder
300 A	1 A	2000 A	5 A

Data spesifikasi dan *setting* relai diferensial yang digunakan pada Transformator Daya Unit 4 di GI Sanggrahan diperlihatkan pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Spesifikasi Relai Diferensial

Parameter	Nilai
Merk	Areva
Tipe	P632
Nomor Serial	2676799/07/07
Arus Nominal	1/5 A
Tegangan Nominal	50-130 V
<i>I setting</i>	0.3 A
<i>I restrain</i>	4 A
<i>Slope1</i>	30%
<i>Slope2</i>	80%

Data nilai arus gangguan hubung singkat dan impedansi sisi 150 kV GI Sanggrahan yang digunakan sebagai bahan penelitian diperlihatkan pada Tabel 4 sebagai berikut:

Tabel 4. Data Arus Hubung Singkat 150 kV GI Sanggrahan

Parameter	Nilai
Tegangan	150 kV
Impedansi Urutan Positif	0.004418 + j0.042485
Impedansi Urutan Negatif	0.004466 + j0.042736
Impedansi Urutan Nol	0.018769 + j0.088503
Arus Hubung Singkat 1 Fasa	7.21 kA
Arus Hubung Singkat 3 Fasa	9.90 kA

3.2. Hasil *Setting* Eksisting dan Perhitungan

Nilai *setting* hasil perhitungan serta *setting* yang digunakan saat ini dapat dilihat melalui data yang disajikan pada tabel 5 sebagai berikut:

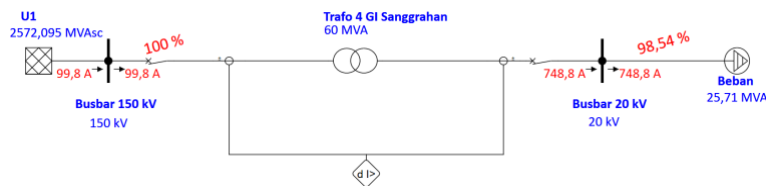
Tabel 5. Data Hasil *Setting* Perhitungan dan *Setting* Eksisting

Parameter	<i>Setting</i> Perhitungan	<i>Setting</i> Eksisting
Arus <i>Setting</i>	0.0962 A	0.3 A
Arus <i>Restrain</i>	0.8179 A	4 A
<i>Slope</i> 1	11.76%	30%
<i>Slope</i> 2	23.52%	80%

Dapat dilihat pada tabel 5 yaitu *setting* hasil perhitungan teoritis dan *setting* eksisting terdapat perbedaan. Nilai *setting* yang berbeda tersebut berpengaruh terhadap respon dan karakteristik relai diferensial. Tahap selanjutnya untuk mengetahui karakteristik *setting* relai diferensial yaitu dengan simulasi gangguan hubung singkat dilakukan dengan bantuan perangkat lunak ETAP untuk mengetahui arus gangguan yang mengalir pada masing-masing transformator arus.

3.3. Simulasi Perangkat Lunak ETAP

Simulasi perangkat lunak dilakukan untuk mengevaluasi respons *setting* relai diferensial dalam kondisi normal dan gangguan. Berbagai jenis gangguan, termasuk gangguan tiga fasa, dua fasa, dan gangguan satu fasa ke tanah, diterapkan baik di dalam maupun di luar zona proteksi. Arus CT yang dihasilkan digunakan untuk menganalisis kinerja relai. Simulasi dilakukan menggunakan ETAP versi 21.0.1. Simulasi aliran daya ini merepresentasikan pada saat kondisi normal atau tanpa gangguan. Simulasi aliran daya pada kondisi normal dapat dilihat pada gambar 2 sebagai berikut:



Gambar 2. Simulasi Aliran Daya

Dapat dilihat pada gambar 2 saat kondisi normal, arus yang mengalir di sisi primer transformator daya yaitu 99.8 A dan arus yang mengalir di sisi sekunder transformator daya yaitu 748.8 A. Pada saat kondisi tersebut relai diferensial diharapkan tidak bekerja karena tidak ada gangguan. Namun, pada kondisi normal arus diferensial tetap mengalir karena adanya ketidaksesuaian CT pada sisi 150 kV dan CT sisi 20 kV. Hal tersebut dapat dibuktikan dengan perhitungan sebagai berikut:

1. Arus sekunder CT sisi tegangan primer 150 kV

$$\begin{aligned}
 i_1 &= \frac{1}{CT \text{ Ratio}} \times I_{150 \text{ kV}} \\
 &= \frac{1}{300} \times 99.8 \text{ A} \\
 &= 0.3326 \text{ A}
 \end{aligned}$$

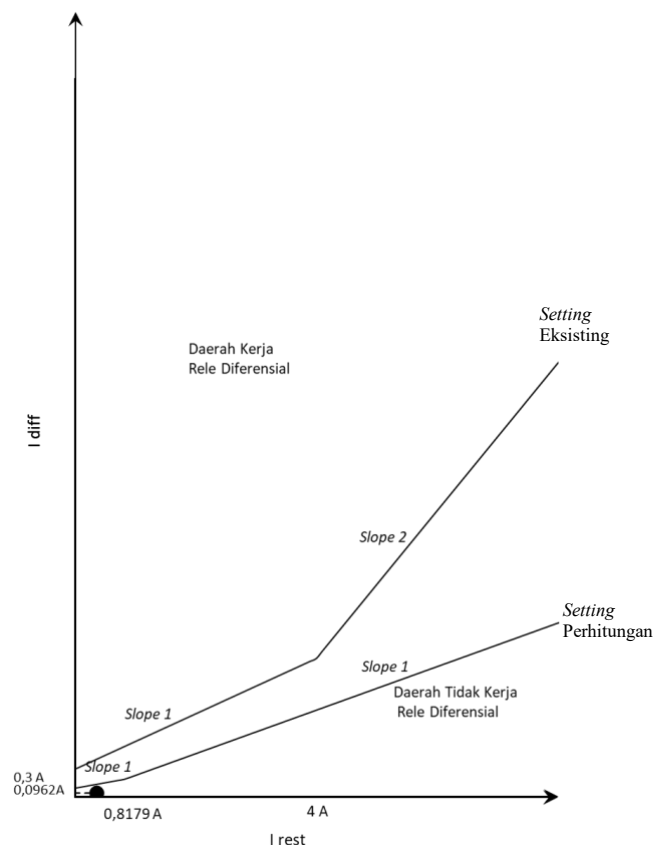
2. Arus sekunder CT sisi tegangan sekunder 20 kV

$$\begin{aligned}
 i_2 &= \frac{1}{CT \text{ Ratio}} \times I_{20 \text{ kV}} \\
 &= \frac{1}{2000} \times 748.8 \text{ A} \\
 &= 0.3744 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Tabel 6 yang merupakan hasil simulasi pada perangkat lunak ETAP, diketahui bahwa relai diferensial hanya bekerja pada gangguan di dalam zona proteksi. Relai akan memerintahkan PMT untuk mengisolasi gangguan saat terjadi hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, maupun 1 fasa ke tanah di dalam zona proteksi. Selain itu, arus diferensial (I_{diff}) meningkat signifikan saat gangguan internal, sedangkan arus penahanan (I_{rest}) meningkat signifikan pada gangguan di luar zona proteksi.

3.4. Karakteristik *Setting* Relai Diferensial Terhadap Gangguan

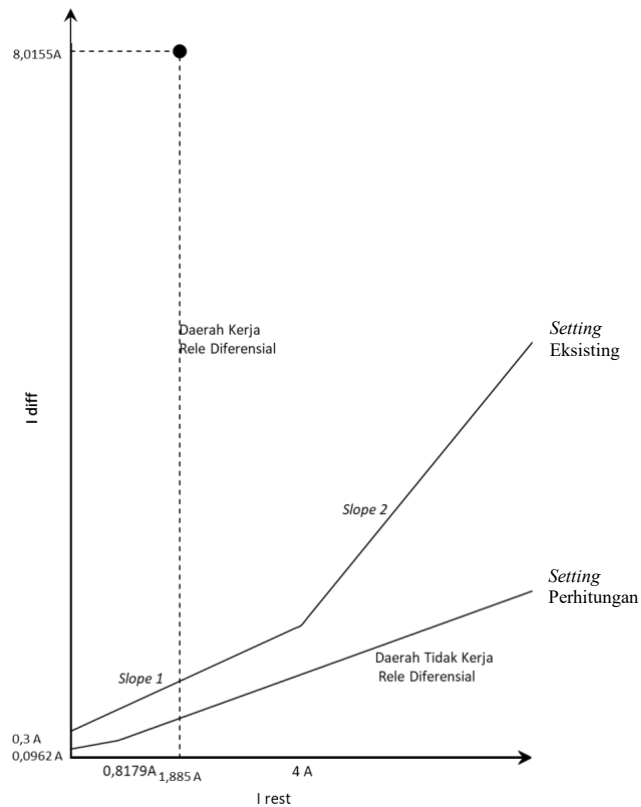
Analisis berikut membahas karakteristik *setting* relai diferensial eksisting dan *setting* hasil perhitungan teoritis pada berbagai kondisi operasi, yaitu kondisi normal tanpa gangguan, gangguan di dalam zona proteksi, dan gangguan di luar zona proteksi. Karakteristik *setting* relai diferensial pada kondisi normal dapat dilihat pada kurva karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 5 berikut:



Gambar 5. Karakteristik *Setting* Perhitungan dan Eksisting Terhadap Kondisi Tanpa Gangguan

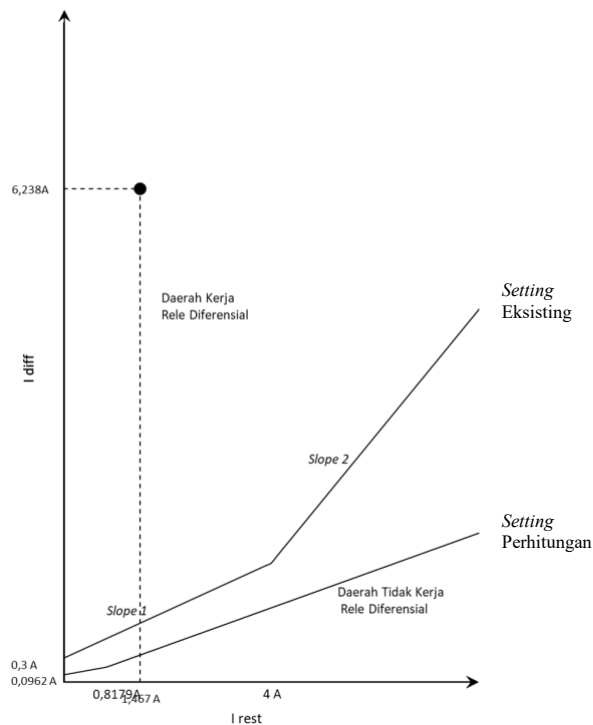
Dapat dilihat pada gambar 5, saat kondisi normal karakteristik *setting* eksisting dan *setting* perhitungan keduanya berada di daerah tidak kerja relai diferensial sehingga karakteristik tersebut sudah sesuai dengan prinsip kerjanya.

Karakteristik *setting* relai diferensial pada kondisi gangguan hubung singkat 3 fasa dalam zona proteksi dapat dilihat pada kurva karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 6. Dapat dilihat pada Gambar 6. bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa di dalam zona proteksi relai diferensial, hasil simulasi menunjukkan nilai arus diferensial sebesar 8.0155 dan arus restrain sebesar 1.885 A. Berdasarkan kurva karakteristik, baik *setting* eksisting maupun hasil perhitungan keduanya berada pada daerah kerja relai diferensial, sehingga karakteristik tersebut telah sesuai dengan prinsip kerjanya.



Gambar 6. Karakteristik *Setting* Perhitungan dan Eksisting Terhadap Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Dalam Zona Proteksi

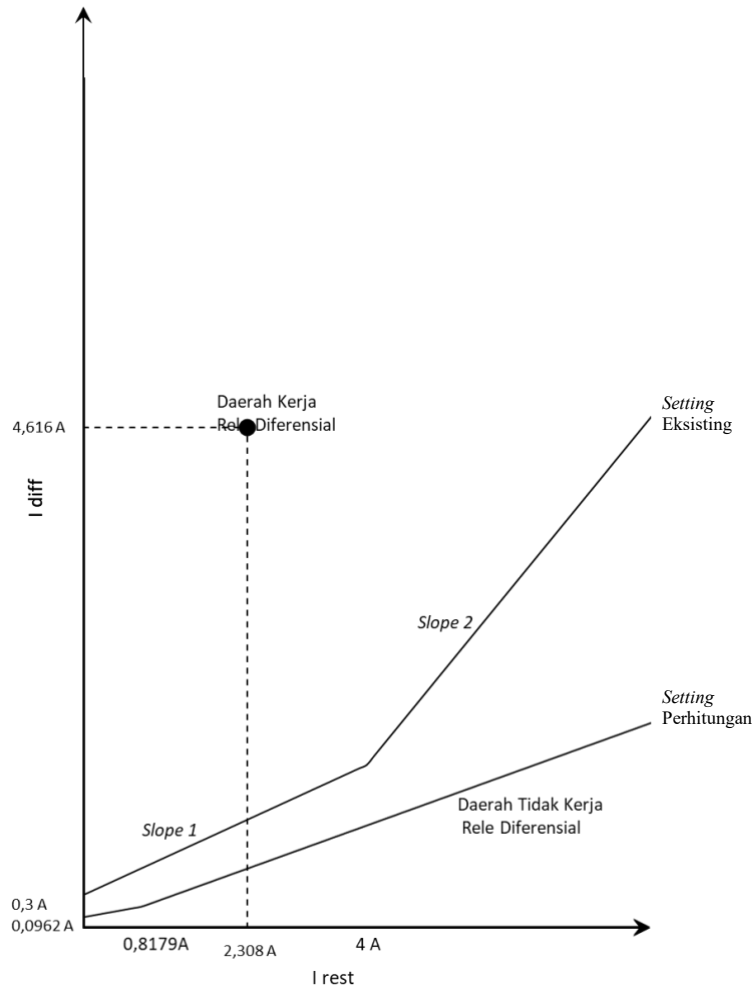
Karakteristik *setting* relai diferensial pada kondisi gangguan hubung singkat 2 fasa dalam zona proteksi dapat dilihat pada kurva karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 7 berikut:



Gambar 7. Karakteristik *Setting* Perhitungan dan Eksisting Terhadap Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa Dalam Zona Proteksi

Dapat dilihat pada Gambar 7 bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat dua fasa di dalam zona proteksi relai diferensial, hasil simulasi menunjukkan nilai arus diferensial sebesar 6.238 A dan arus restrain sebesar 1.467 A. Berdasarkan kurva karakteristik, baik *setting* eksisting maupun *setting* hasil perhitungan keduanya berada pada daerah kerja relai diferensial, sehingga karakteristik tersebut telah sesuai dengan prinsip kerjanya.

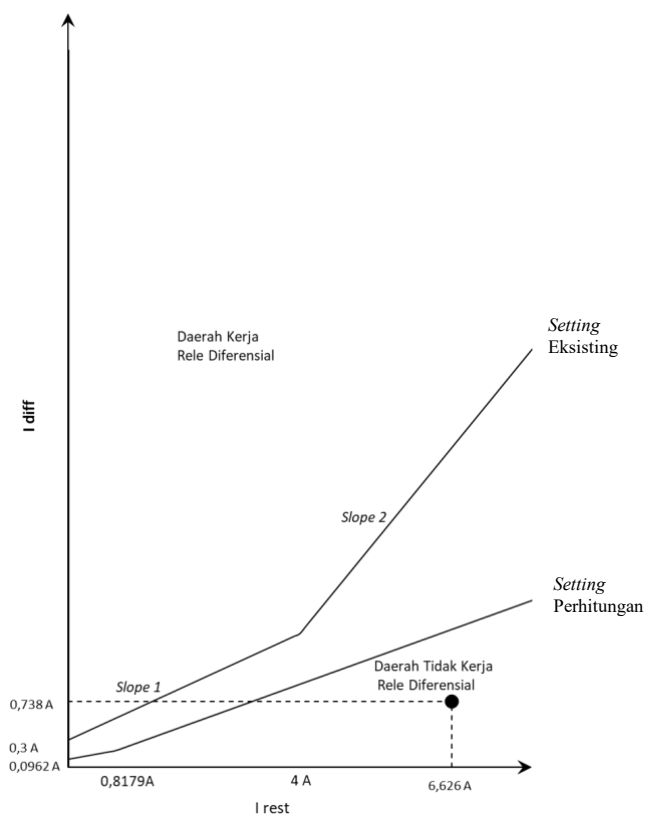
Karakteristik *setting* relai diferensial pada kondisi gangguan hubung singkat 1 fasa dalam zona proteksi dapat dilihat pada kurva karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 8 sebagai berikut.



Gambar 8. Karakteristik *Setting* Perhitungan dan Eksisting Terhadap Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah Dalam Zona Proteksi

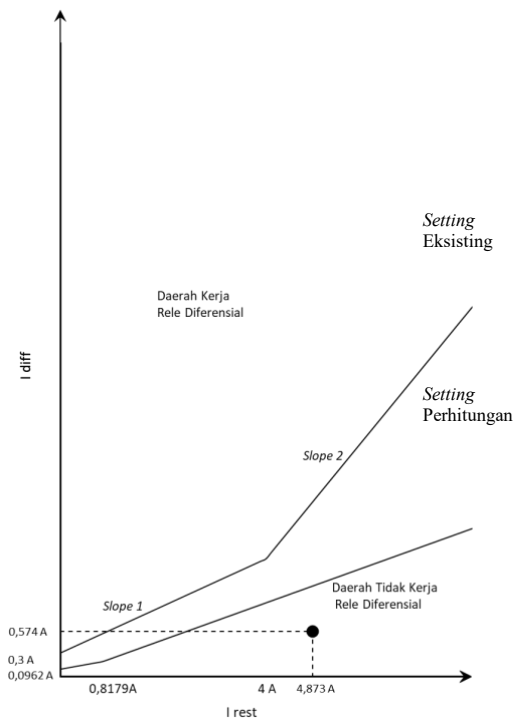
Dapat dilihat pada Gambar 8. bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah di dalam zona proteksi relai diferensial, hasil simulasi menunjukkan nilai arus diferensial sebesar 4.616 A dan arus restrain sebesar 2.308 A. Berdasarkan kurva karakteristik, baik *setting* eksisting maupun hasil perhitungan keduanya berada pada daerah kerja relai diferensial, sehingga karakteristik tersebut telah sesuai dengan prinsip kerjanya.

Karakteristik *setting* relai diferensial pada kondisi gangguan hubung singkat 3 fasa luar zona proteksi dapat dilihat pada kurva karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 9. Dapat dilihat pada Gambar 9 bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa di luar zona proteksi relai diferensial, hasil simulasi menunjukkan nilai arus diferensial sebesar 0.738 A dan arus restrain sebesar 6.262 A. Berdasarkan kurva karakteristik, baik *setting* eksisting maupun hasil perhitungan keduanya berada pada daerah tidak kerja relai diferensial, sehingga karakteristik tersebut telah sesuai dengan prinsip kerjanya.



Gambar 9. Karakteristik *Setting* Perhitungan dan Eksisting Terhadap Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa Luar Zona Proteksi

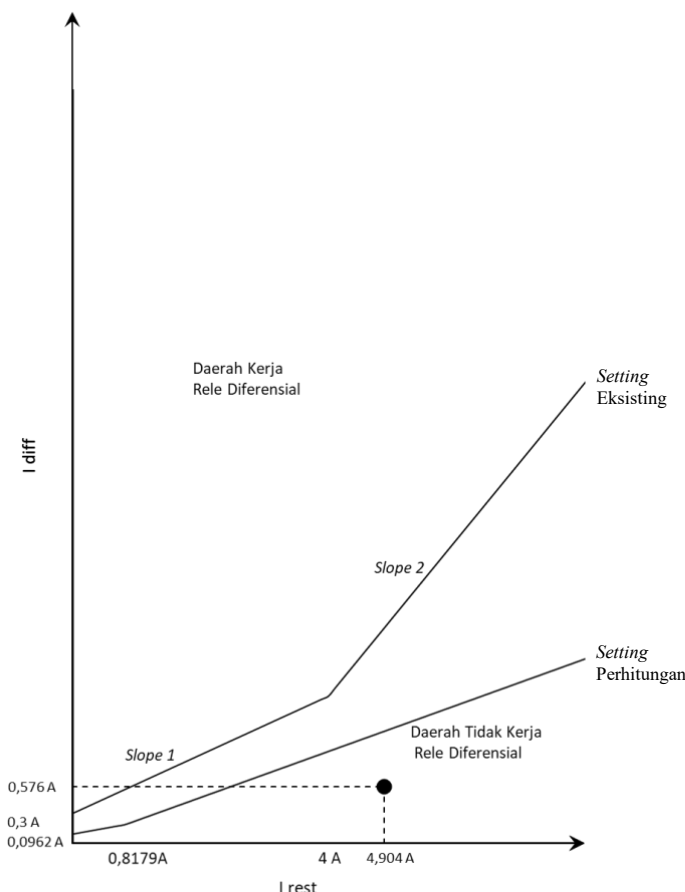
Karakteristik *setting* relai diferensial pada kondisi gangguan hubung singkat 2 fasa luar zona proteksi dapat dilihat pada kurva karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 10 berikut:



Gambar 10. Karakteristik *Setting* Perhitungan dan Eksisting Terhadap Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa Luar Zona Proteksi

Dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat dua fasa di luar zona proteksi relai diferensial, hasil simulasi menunjukkan nilai arus diferensial sebesar 0.574 A dan arus restrain sebesar 4.873 A. Berdasarkan kurva karakteristik, baik *setting* eksisting maupun hasil perhitungan keduanya berada pada daerah tidak kerja relai diferensial, sehingga karakteristik tersebut telah sesuai dengan prinsip kerjanya.

Karakteristik *setting* relai diferensial pada kondisi gangguan hubung singkat 1 fasa luar zona proteksi dapat dilihat pada kurva karakteristik yang ditunjukkan pada gambar 11 sebagai berikut.



Gambar 11. Karakteristik *Setting* Perhitungan dan Eksisting Terhadap Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah Luar Zona Proteksi

Dapat dilihat pada Gambar 11 bahwa saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah di luar zona proteksi relai diferensial, hasil simulasi menunjukkan nilai arus diferensial sebesar 0.576 A dan arus restrain sebesar 4.904 A. Berdasarkan kurva karakteristik, baik *setting* eksisting maupun hasil perhitungan keduanya berada pada daerah tidak kerja relai diferensial, sehingga karakteristik tersebut telah sesuai dengan prinsip kerjanya

Berdasarkan analisa karakteristik *setting* relai diferensial eksisting maupun *setting* hasil perhitungan secara teori terhadap gangguan hubung singkat 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah di dalam maupun di luar zona proteksi relai diferensial, diperoleh hasil seperti yang ditunjukkan pada tabel 7 berikut. Dapat dilihat pada tabel 7 bahwa relai diferensial hanya akan bekerja ketika terjadi gangguan hubung singkat di dalam zona proteksi, baik gangguan 3 fasa, 2 fasa, maupun 1 fasa ke tanah. Berdasarkan hasil analisis pada seluruh kondisi, yaitu kondisi normal, gangguan di dalam zona proteksi, dan gangguan di luar zona proteksi, diperoleh bahwa kedua *setting* yang diterapkan memiliki karakteristik yang serupa. Relai bekerja pada saat terjadi gangguan di dalam zona proteksi dan tidak bekerja pada kondisi normal maupun saat terjadi gangguan di luar zona proteksi

Tabel 7. Hasil Kerja Relai Diferensial Berdasarkan *Setting* Eksisting, *Setting* Perhitungan, dan Simulasi ETAP

Kondisi	Jenis Gangguan Hubung Singkat	Titik Operasi Relai		<i>Setting</i> Eksisting	<i>Setting</i> Perhitung-an	Hasil ETAP
		I Diff (A)	I Rest (A)			
Normal	Tidak Ada	0,0418	0,3535	Tidak Trip	Tidak Trip	Tidak Trip
Gangguan Dalam Zona Proteksi	3 Fasa	8,0155	1,885	Trip	Trip	Trip
	2 Fasa	6,238	1,467	Trip	Trip	Trip
	1 Fasa ke Tanah	4,616	2,308	Trip	Trip	Trip
Gangguan Luar Zona Proteksi	3 Fasa	0,738	6,262	Tidak Trip	Tidak Trip	Tidak Trip
	2 Fasa	0,574	4,873	Tidak Trip	Tidak Trip	Tidak Trip
	1 Fasa ke Tanah	0,576	4,904	Tidak Trip	Tidak Trip	Tidak Trip

3.5. Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis, terdapat perbedaan antara *setting* relai diferensial eksisting PLN dan *setting* hasil perhitungan teoritis pada parameter arus diferensial, arus restrain, *Slope* 1, dan *Slope* 2, sehingga menghasilkan perbedaan pada kurva karakteristik yang menentukan daerah operasi (*operating region*) dan daerah penahan (*restraining region*). Namun, berdasarkan hasil simulasi ETAP untuk gangguan tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah pada kondisi gangguan internal maupun eksternal, kedua *setting* menunjukkan kinerja yang sesuai dengan prinsip kerja proteksi diferensial. Relai bekerja saat terjadi gangguan internal dan tetap stabil pada gangguan eksternal, meskipun *setting* eksisting memiliki daerah operasi yang lebih sempit dibandingkan dengan *setting* hasil perhitungan.

Perbedaan tersebut disebabkan oleh standar PLN yang menetapkan arus *pickup* sebesar $(0,2-0,3) \times I_{nom}$, *Slope* 1 sebesar 25%–35%, dan *Slope* 2 sebesar 50%–80% [15]. Selain itu, penentuan *setting* juga mempertimbangkan kondisi operasi transformator, seperti arus *inrush*, arus eksitasi, serta berbagai faktor kesalahan, meliputi kesalahan *tap changer*, kesalahan transformator arus (CT), *mismatch*, arus eksitasi, dan faktor keamanan. Dalam perhitungan arus penahan, beberapa produsen seperti Alstom, ABB, Toshiba, dan GE menggunakan formulasi khusus untuk *restraining current*, sedangkan Siemens menerapkan pendekatan yang berbeda [15].

Nilai *Slope* 1 dan *Slope* 2 yang lebih tinggi pada *setting* PLN memberikan tingkat keamanan yang lebih baik terhadap kemungkinan salah operasi akibat saturasi CT selama gangguan eksternal maupun kejadian *Through Fault Current* (TFC). Meskipun nilai tersebut menyebabkan daerah operasi menjadi lebih sempit dibandingkan hasil perhitungan teoritis, pengaturan ini meningkatkan stabilitas relai dan lebih mencerminkan kondisi nyata sistem tenaga listrik. Temuan ini menunjukkan bahwa penentuan *setting* relai dalam praktik tidak hanya didasarkan pada perhitungan teoritis yang ideal, tetapi juga mempertimbangkan pengalaman operasional, keterbatasan peralatan, dan standar utilitas yang berlaku.

Pertimbangan tersebut menghasilkan nilai *Slope* 1 dan *Slope* 2 yang lebih tinggi pada *setting* PLN, sehingga membentuk daerah operasi yang lebih sempit sekaligus meningkatkan stabilitas terhadap gangguan eksternal. Oleh karena itu, *setting* PLN lebih representatif terhadap kondisi aktual sistem tenaga listrik dibandingkan dengan perhitungan teoritis yang didasarkan pada asumsi ideal. *Setting* ini diharapkan tetap menjaga selektivitas relai terhadap gangguan internal sekaligus mempertahankan stabilitas pada kondisi *Through Fault Current* (TFC), yang sering terjadi pada transformator Unit 4 Gardu Induk Sanggrahan dan berpotensi menimbulkan tekanan termal serta mekanis pada transformator.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, perhitungan, dan simulasi, dapat disimpulkan bahwa relai diferensial pada transformator daya 60 MVA Unit 4 GI 150 kV Sanggrahan telah bekerja sesuai prinsip proteksi, yaitu sensitif terhadap gangguan di dalam zona proteksi dan stabil terhadap gangguan di luar zona proteksi maupun kondisi *Through Fault Current* (TFC). Perbandingan *setting* eksisting PLN dengan hasil perhitungan teoritis menunjukkan adanya perbedaan nilai arus diferensial, *arus restrain*, dan *slope*, namun perbedaan tersebut tidak menyebabkan penurunan kinerja proteksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa *setting* eksisting tetap mampu mengamankan transformator terhadap gangguan 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah serta tetap stabil terhadap gangguan eksternal. Dengan demikian, *setting* relai diferensial eksisting dinilai telah sesuai dan mampu memberikan proteksi yang andal pada transformator daya 60 MVA Unit 4 GI 150 kV Sanggrahan.

REFERENSI

- [1] Wisnu Wardhana, Abdul Azis, and Yudi Irwansi, "Analisa Penurunan Umur Transformator Akibat Pengaruh Pembebanan dan Temperatur di PT PLN (Persero) P3B Sumatera UPT Palembang Gardu Induk Keramasan," 2024, doi: 10.32502/jse.v9i1.283.
- [2] N. Ulfah Maharani, A. Trihasto, and D. Pravitasari, "Evaluasi Kinerja Rele Arus Lebih Dan Rele Diferensial pada Generator Kapasitas 100 Mw," *THETA OMEGA J. Electr. Eng.*, p. 2021, 2021, doi: <https://doi.org/10.31002/jeecit.v2i1>
- [3] A. Sofwan, "Sistem Proteksi Teknik Tenaga Listrik," Jakarta, 2021.
- [4] IEEE Power and Energy Society, IEEE Guide for Protecting Power Transformers, IEEE Std. C37.91-2021, Jun. 2021.
- [5] Ferdiansyah, Subhan, and Nazaruddin, "Studi Penggunaan Rele Differensial Type P642 Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya 30 MVA Gardu Induk Pantan Labu PT. PLN (Persero) Aceh Utar," vol. 7, no. 1, pp. 78–83, 2023, doi: <https://doi.org/10.30811/tektro.v7i1.3865>
- [6] A. S. Prakarsa, "Analisa Penggunaan Relai Diferensial Sebagai Proteksi Pada Transformator Daya Gardu Induk Sekarputih (PT. PLN PERSERO)," 2024, doi: 10.31284/j.JREEC.2024.V4i1.5784.
- [7] N. Wicaksono, P. Gagini Chamdareno, and E. Dermawan, "Peningkatan Keandalan Trafo Gardu Induk 150/20 kV terhadap Gangguan Through Fault Current dari Sisi Penyulang 20 kV di Wilayah PT PLN (Persero) UIT JBB," vol. 8, no. 1, pp. 37–42, 2025, doi: <https://doi.org/10.24853/resistor.8.1.37-42>.
- [8] E. Farlen, D. Martoni, and L. Agung, "Diagnosis Of Withstand Test Power Transformer Based on Through Fault Current Disturbance," pp. 321–326, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS.2017.8225965>.
- [9] S. Bagheri, Z. Moravej, and G. B. Gharehpetian, "Effect of transformer winding mechanical defects , internal and external electrical faults and inrush currents on performance of differential protection," 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1239.
- [10] M. Ilma, E. Ezwarsyah, S. Salahuddin, A. Bintoro, and A. 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, doi: <https://doi.org/10.29103/jee.v13i1.18042>
- [11] M. A. Haidar and A. Sofwan, "Unjuk kerja rele diferensial pada transformator 150/20 kV terhadap gangguan hubung singkat dengan ETAP 12.6," *J. Informatika dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3S1, 2024, doi: <https://doi.org/10.23960/jitet.v12i3S1.4914>
- [12] M. R. Ardiansyah and Liliana, "Differential relay settings as protection on a 52 MVA Unit 4 power transformer PLTA Singkarak," *Indonesian J. Electr. Eng. Renewable Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2024, doi: <https://doi.org/10.57152/ijeere.v4i1.1405>
- [13] D. E. Kusuma and I. A. Darmawan, "Perbandingan setting matematis rele diferensial transformator daya dengan setting GI 150 kV Cilegon Baru PT. PLN (Persero) ULTG Cilegon," *J. Elektron. dan Tek. Inform. Terap. (JENTIK)*, vol. 2, no. 2, pp. 24–38, 2024, doi: <https://doi.org/10.59061/jentik.v2i2.667>
- [14] I. Chaerah Gunadin, Yustinus Upa Sombolayuk, and Caesar William Alexander, "Analisis Kinerja Relai Diferensial Pada Sistem Proteksi Transformator Daya PLTA Bakar," *J. Eksitasi*, vol. 2, no. 2, pp. 1–13, 2023.
- [15] Tim PLN P3B Jawa Bali, Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali, ed. 1. Jakarta, Indonesia: PT PLN (Persero) Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban Jawa-Bali, 2013.