

ANALISIS KINERJA RELAI DIFERENSIAL PADA GENERATOR PLTA PANGLIMA BESAR SOEDIRMAN MRICA BERDASARKAN DATA PENGUJIAN LAPANGAN

Antika Prasetyaningtyas^{1*}, Muhammad Syukron², Alvin Zuhair³, Kukuh Trisna Pambudi⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Teknik Mekatronika, dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik Universitas Tidar; Jl. Kapten Suparman 39 Potrobangsan, Magelang Utara, Jawa Tengah; (0293) 364113

Keywords:

Sistem Proteksi; Relai Diferensial; Pengujian Proteksi.

Correspondent Email:

prasetyaningtyas@untidar.ac.id

Abstrak. Keandalan system proteksi generator sangat bergantung pada kinerja Relai diferensial yang harus mampu mendeteksi gangguan internal secara cepat dan selektif. Kinerja Relai dapat menurun akibat penuaan peralatan, perubahan konfigurasi sistem, dan ketidaksesuaian pengaturan, sehingga pengujian berkala berbasis data lapangan menjadi sangat penting. Penelitian ini mengevaluasi kinerja Relai diferensial tipe ASEA RADSB melalui pengujian arus setting, waktu operasi, karakteristik restraint, dan second harmonic restraint. Hasil pengujian menunjukkan arus pickup rata-rata sebesar 326,889 mA berada dalam rentang standar pabrikan 315-385 mA, waktu operasi rata-rata 30,667 ms sesuai standar 27-33 ms, karakteristik restraint berada dalam batas aman pada injeksi arus 1,5 A dan 3 A, serta persentase harmonisa kedua sebesar 14,79% masih dalam rentang 14-18%. Berdasarkan hasil tersebut Relai diferensial ASEA RADSB dinyatakan beroperasi normal dan layak digunakan sebagai system proteksi generator.



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstract. The reliability of generator protection systems depends heavily on the performance of differential relays, which must quickly and selectively detect internal faults. Relay performance may degrade due to equipment aging, system configuration changes, and improper settings; therefore, periodic field-based testing is essential. This study evaluates the performance of an ASEA RADSB differential relay through pickup current testing, operating time testing, restraint characteristic testing, and second harmonic restraint testing. The test results show that the average pickup current is 326,889 mA, which falls within the manufacturer's standard range of 315–385 mA. The average operating time is 30,667 ms, complying with the standard range of 27–33 ms. The restraint characteristics remain within safe limits at injection currents of 1.5 A and 3 A, and the second harmonic percentage of 14.79% is still within the specified range of 14–18%. Based on these results, the ASEA RADSB differential relay is confirmed to operate normally and is suitable for use as a generator protection system.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan komoditas primer yang sangat vital dalam kehidupan modern karena mendukung aktivitas rumah tangga, pemerintahan, dan industri seiring dengan pertumbuhan populasi dan penetrasi peralatan listrik yang terus meningkat [1][2]. Dalam

sistem tenaga listrik, kontinuitas pasokan daya dengan kualitas tegangan yang stabil menjadi tujuan utama perencanaan dan operasi sistem, yang mencakup tiga komponen utama yaitu pembangkitan, transmisi, dan distribusi [3]. Pada sisi pembangkitan, generator dan transformator merupakan peralatan kritis yang

harus dilindungi oleh sistem proteksi yang andal untuk menjaga keberlanjutan operasi pembangkit [4][5][6]. Keandalan sistem proteksi didefinisikan sebagai kemampuan perangkat proteksi untuk berfungsi sesuai dengan kondisi operasi dan periode waktu yang ditetapkan, serta mampu mendeteksi dan mengisolasi gangguan secara selektif dan cepat sehingga bagian sistem yang tidak terganggu tetap dapat beroperasi normal [7][8]. Salah satu metode proteksi utama pada generator dan transformator adalah proteksi diferensial, di mana Relai diferensial bekerja berdasarkan perbedaan arus masuk dan keluar dari zona proteksi untuk mendeteksi gangguan internal secara cepat dan akurat [9].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa keandalan Relai diferensial sangat menentukan tingkat perlindungan generator terhadap gangguan internal. Xia et al. (2021) mengembangkan skema braking baru pada proteksi diferensial generator dan menunjukkan bahwa metode tersebut mampu meningkatkan stabilitas proteksi lebih dari 30% pada kondisi transien tanpa mengurangi sensitivitas terhadap gangguan internal [10]. Le dan Vu (2019) melaporkan bahwa penyimpangan kecil pada parameter setting, seperti slope dan pickup current, dapat menyebabkan keterlambatan trip hingga 40–60 ms atau bahkan kegagalan operasi pada gangguan internal berimpedansi rendah [11]. Dalam konteks sistem tenaga di negara berkembang, Hardi et al. (2020) melaporkan adanya deviasi karakteristik Relai diferensial generator akibat faktor penuaan peralatan dan perubahan konfigurasi sistem, yang berpotensi menurunkan sensitivitas proteksi hingga di bawah batas aman yang direkomendasikan [5]. Secara umum, hasil-hasil empiris tersebut menegaskan bahwa performa Relai diferensial tidak bersifat statis sepanjang umur operasi, karena dipengaruhi oleh penuaan peralatan, perubahan konfigurasi sistem, serta ketidaksesuaian setting [12][13]. Oleh karena itu, pengujian berkala berbasis data aktual lapangan menjadi kebutuhan penting untuk memastikan Relai diferensial tetap bekerja sesuai karakteristik rancangannya, khususnya pada pembangkit strategis seperti PLTA Panglima Besar Soedirman [13][9].

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji algoritma proteksi diferensial,

evaluasi setting Relai, serta pengujian berbasis simulasi dan laboratorium, masih terdapat keterbatasan studi yang melakukan evaluasi komprehensif berbasis data aktual lapangan pada Relai diferensial generator yang telah beroperasi dalam jangka panjang. Sebagian besar penelitian dalam lima tahun terakhir berfokus pada Relai numerik modern dan konsep adaptive protection, sementara performa Relai *legacy* pada pembangkit eksisting di negara berkembang masih jarang dilaporkan secara empiris [9][14][15]. Oleh karena itu, penelitian ini menghadirkan kebaruan melalui evaluasi menyeluruh Relai diferensial tipe ASEA RADSB di PLTA Panglima Besar Soedirman dengan menganalisis parameter arus pick-up, waktu operasi, karakteristik restraint, dan second harmonic restraint berdasarkan data pengujian lapangan serta perbandingan langsung dengan spesifikasi pabrikan. Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi kesesuaian kinerja Relai diferensial terhadap standar pabrikan dan karakteristik teoritis, menilai sensitivitas dan stabilitas proteksi terhadap gangguan internal dan eksternal, serta memberikan rekomendasi teknis untuk peningkatan keandalan proteksi generator pada pembangkit tenaga air [12][16].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Proteksi Generator

Generator merupakan peralatan utama pada sistem pembangkitan yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi Listrik. Karena nilai investasi dan peran strategisnya dalam sistem tenaga, generator harus dilengkapi sistem proteksi yang mampu mendeteksi gangguan secara cepat, selektif, dan andal. Gangguan internal seperti hubung singkat antar lilitan stator, gangguan fasa ke tanah, maupun gangguan antar fasa dapat menyebabkan kerusakan serius apabila tidak segera diisolasi. Keandalan sistem proteksi didefinisikan sebagai probabilitas bahwa sistem mampu bekerja sesuai fungsi yang ditetapkan dalam kondisi operasi tertentu. Parameter utama keandalan proteksi meliputi sensitivitas, selektivitas, kecepatan operasi, dan stabilitas terhadap gangguan eksternal. Proteksi generator umumnya terdiri dari proteksi arus lebih, proteksi diferensial, proteksi hubung

tanah, proteksi tegangan lebih, serta proteksi kehilangan eksitasi [17][18].

2.2. Prinsip Kerja Relai Diferensial

Relai diferensial bekerja berdasarkan prinsip hukum Kirchoff arus, yaitu jumlah arus yang masuk dan keluar suatu zona proteksi harus sama dalam kondisi normal. Secara matematis dinyatakan sebagai

Dalam kondisi normal atau gangguan eksternal:

$$I_{in} \approx I_{out}$$

sehingga:

$$I_{diff} \approx 0$$

Namun pada gangguan internal:

$$I_{in} \neq I_{out}$$

sehingga timbul arus diferensial yang menyebabkan relai bekerja (trip).

Untuk meningkatkan stabilitas terhadap kesalahan rasio CT dan gangguan eksternal, digunakan arus penahan (restraining current) yang dirumuskan sebagai:

$$I_{rest} = \frac{|I_1| + |I_2|}{2}$$

Karakteristik operasi relai dinyatakan dalam bentuk slope:

$$Slope = \frac{I_{diff}}{I_{rest}} \times 100\%$$

Relai akan bekerja apabila:

$$I_{diff} > (Slope \times I_{rest}) + I_{pickup}$$

Prinsip ini memungkinkan relai membedakan gangguan internal dan eksternal secara selektif [16][9].

2.3. Karakteristik Restraint dan Stabilitas Proteksi

Pada gangguan eksternal dengan arus besar, ketidakakuratan transformator arus (CT) dapat menyebabkan timbulnya arus diferensial semu. Untuk mencegah mal-operasi, relai diferensial dilengkapi rangkaian penahan (restraining circuit).

Karakteristik penahan umumnya terbentuk dua slope :

- a. Slope rendah untuk arus kecil

- b. Slope tinggi untuk arus gangguan besar

Karakteristik ini bertujuan menjaga stabilitas system proteksi pada kondisi

- a. Gangguan luar zona
- b. Saturasi CT
- c. Perbedaan rasio transformator arus

Stabilitas proteksi sangat penting agar relai tidak salah trip yang dapat menyebabkan pemadaman tidak perlu [5][19].

2.4. Second Harmonic Restraint pada Generator dan Transformator

Saat transformator atau generator pertama kali diberi tegangan, terjadi arus inrush yang mengandung komponen harmonisa kedua cukup besar. Jika tidak dibedakan, relai diferensial dapat salah menginterpretasikan arus ini sebagai gangguan internal.

Untuk mengatasi hal tersebut, relai diferensial dilengkapi fitur second harmonic restraint yang bekerja berdasarkan rasio:

$$\%H_2 = \frac{I_2}{I_1} \times 100\%$$

di mana:

I_2 = arus harmonisa kedua

I_1 = arus fundamental

Relai akan diblokir apabila persentase harmonisa kedua melebihi nilai ambang tertentu (umumnya 14%-18%). Dengan demikian, relai tetap stabil terhadap fenomena inrush namun tetap sensitive terhadap gangguan internal murni [19].

2.5. Pengujian relai dengan metode secondary injection

Evaluasi kinerja relai proteksi dilakukan menggunakan metode secondary injection, yaitu dengan menginjeksikan arus dan tegangan simulasi langsung pada terminal sekunder relai tanpa melibatkan system primer[20].

Metode ini memungkinkan pengujian parameter:

- a. Arus pick up
- b. Waktu operasi
- c. Karakteristik restraint
- d. Harmonic restraint

Keunggulan metode secondary injection mel

- a. Akurasi tinggi
- b. Tidak mengganggu system operasi
- c. Dapat mensimulasikan berbagai kondisi gangguan

d. Sesuai standar pengujian industry

2.6. Faktor Penuaan dan Perubahan Setting Relai

Kinerja relai diferensial sebagai perangkat proteksi utama pada generator tidak bersifat statis sepanjang masa operasinya. Dalam jangka waktu tertentu, karakteristik kerja relai dapat mengalami perubahan akibat berbagai faktor teknis maupun operasional. Salah satu faktor utama adalah penuaan komponen internal, baik pada elemen elektromekanik maupun rangkaian elektronik, yang berpotensi menyebabkan perubahan respon dinamis, peningkatan resistansi kontak, serta penurunan akurasi pengukuran arus.

Selain itu, fenomena drift kalibrasi dapat seiring waktu akibat variasi temperature lingkungan, kelembapan, maupun degradasi material isolasi. Drift ini dapat menggeser nilai arus pick-up dan karakteristik restraint dari nilai setelan awal, sehingga memengaruhi sensitivitas dan selektivitas proteksi. Perubahan rasio transformator arus (CT), baik akibat penggantian peralatan maupun modifikasi konfigurasi system, juga dapat menimbulkan ketidaksesuaian antara parameter desain dan kondisi actual system. Ketidaksesuaian tersebut berpotensi menghasilkan arus diferensial semu atau bahkan mengurangi kemampuan relai dalam mendeteksi gangguan internal secara akurat.

Lebih lanjut, modifikasi konfigurasi sistem tenaga, seperti perubahan kapasitas generator, rekonfigurasi jaringan, atau penambahan peralatan baru, dapat mengubah profil arus gangguan dan distribusi impedansi sistem. Apabila parameter setting relai tidak disesuaikan dengan kondisi terbaru, maka koordinasi proteksi dapat terganggu.

Deviasi parameter proteksi, meskipun dalam skala kecil, dapat berdampak signifikan terhadap performa sistem. Pergeseran nilai arus pick-up dapat menyebabkan keterlambatan operasi (trip delay), penurunan sensitivitas terhadap gangguan internal berimpedansi rendah, atau bahkan kegagalan operasi. Sebaliknya, setting yang terlalu sensitif dapat meningkatkan risiko mal-operasi pada gangguan eksternal atau kondisi transien seperti arus inrush. Kedua kondisi tersebut berpotensi menimbulkan konsekuensi operasional dan ekonomis yang serius, termasuk kerusakan

generator, gangguan kontinuitas pasokan, serta biaya pemeliharaan yang tinggi.

Oleh karena itu, pengujian dan verifikasi kinerja relai secara berkala berbasis data aktual lapangan merupakan langkah esensial untuk memastikan bahwa karakteristik operasi relai tetap sesuai dengan standar pabrikaan dan parameter desain awal. Pendekatan ini tidak hanya menjamin keandalan sistem proteksi, tetapi juga mendukung prinsip preventive maintenance dalam sistem tenaga listrik [21][15].

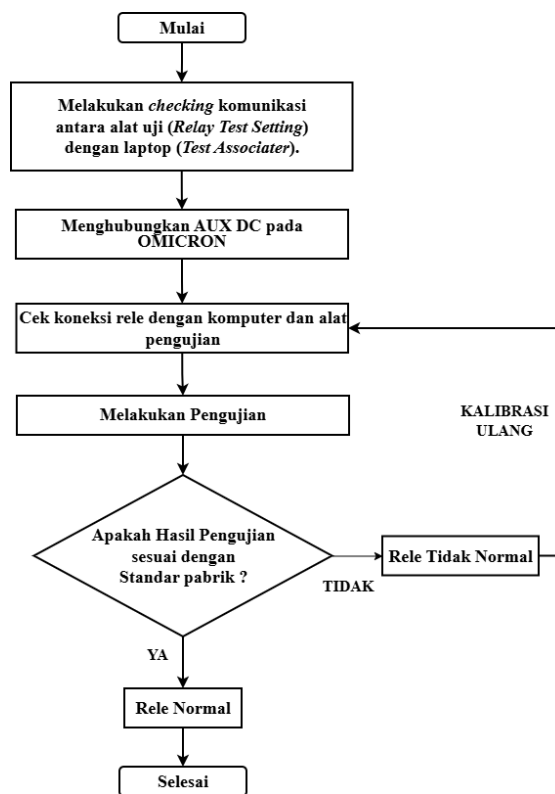
3. METODE PENELITIAN

Pengujian dilakukan pada Relai diferensial tipe RADSB ASEA yang terpasang pada Unit 1 PLTA Panglima Besar Soedirman, PT Indonesia Power UP Mrica [22]. Proses pengujian dilakukan menggunakan *universal relay test set and commissioning tool* OMICRON CMC 356 yang terintegrasi dengan perangkat lunak bawaan, serta didukung oleh peralatan penunjang berupa kabel pengujian, laptop, *straight cable*, serat optik, dan perangkat pendukung lainnya [23]. Data hasil pengujian dianalisis dan dibandingkan dengan spesifikasi serta standar pabrikaan Relai diferensial untuk menentukan apakah kinerja Relai berada dalam kondisi normal atau menyimpang [24]. Alur pelaksanaan pengujian secara sistematis ditunjukkan pada Gambar 1 dalam bentuk diagram alir.

3.1. Relai Diferensial RADSB ASEA

Relai yang diuji dalam penelitian ini adalah Relai diferensial tipe RADSB ASEA, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, dengan konfigurasi instalasi sesuai yang dirangkum pada Tabel 1 [22]. Relai ini berfungsi sebagai proteksi utama bagi generator dan transformator pada Unit 1 PLTA Panglima Besar Soedirman. Serangkaian pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja Relai secara komprehensif, meliputi pengujian arus setting operasi, pengujian waktu operasi, pengujian karakteristik restraint, serta pengujian second harmonic restraint. Pengujian-pengujian tersebut dirancang untuk menilai kesesuaian respons Relai terhadap parameter yang ditetapkan serta kemampuannya dalam membedakan kondisi gangguan internal dan kondisi non-gangguan, seperti arus inrush.

Konfigurasi sistem yang dilindungi oleh Relai ditunjukkan pada single line diagram pada Gambar 3, sedangkan Gambar 4 memperlihatkan plant circuit diagram dari Relai diferensial yang digunakan [25]. Penyajian diagram ini bertujuan memberikan gambaran menyeluruh mengenai posisi dan peran Relai dalam sistem proteksi generator–transformator, sekaligus menjadi acuan dalam pelaksanaan dan interpretasi hasil pengujian.



Gambar 1. Diagram Alir Pengujian

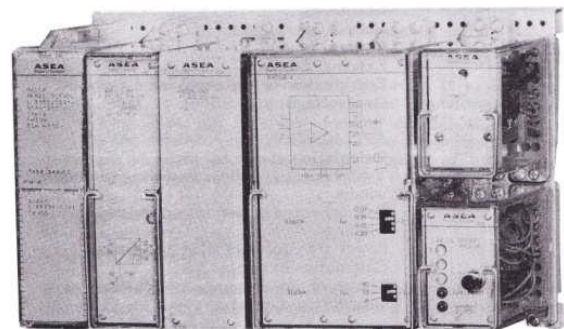
Tabel 1. Instalasi Relai Diferensial RADS B Asca

	Sirkuit 1 Trafo T1 pada sisi 150 KV	Sirkuit 2 Netral Generator	Sirkuit 3 sisi primer Trafo bantu T11
Rasio CT utama	300/1 A hubung Y	300/5 A hubung Y	100/5 A hubung Y
Rasio ACT	1,5/ 1 A hubung Yd	4,88/ 1 A hubung Y	14,6/ 0,1 A hubung Y

3.2. Alat Uji OMICRON CMC 356

OMICRON CMC 356 merupakan perangkat uji universal yang dirancang untuk pengujian berbagai generasi dan jenis Relai proteksi, baik

elektromekanik, statik, maupun numerik. Peralatan ini dilengkapi dengan enam sumber arus berdaya tinggi yang dapat beroperasi dalam mode tiga fasa, dengan kemampuan keluaran hingga 64 A atau 860 VA per chanel. Rentang dinamis yang luas memungkinkan perangkat ini melakukan pengujian pada Relai dengan beban elektromekanik yang besar dan kebutuhan daya tinggi, sehingga tetap mampu mereplikasi kondisi operasi sistem secara akurat. Tampilan fisik dan antarmuka peralatan OMICRON CMC 356 ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6 [23].



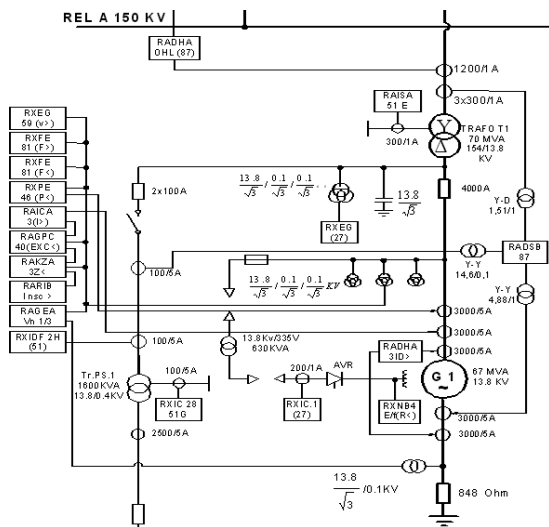
Gambar 2. Relai Diferensial RADS B ASEA

Keunggulan utama OMICRON CMC 356 terletak pada kemampuannya menghasilkan arus uji beramplitudo tinggi untuk pengujian Relai dengan rating 5 A, disertai tingkat akurasi dan fleksibilitas yang tinggi dalam pengukuran berbagai karakteristik Relai. Perangkat ini mendukung pengujian Relai statik maupun numerik, serta telah dilengkapi jaringan terintegrasi untuk pengujian Intelligent Electronic Devices (IED) berbasis standar IEC 61850. Selain itu, OMICRON CMC 356 mampu melakukan pengukuran analog hingga sepuluh chanel secara simultan dan menyediakan fungsi perekaman sementara, sehingga memudahkan analisis respons Relai selama proses pengujian berlangsung.

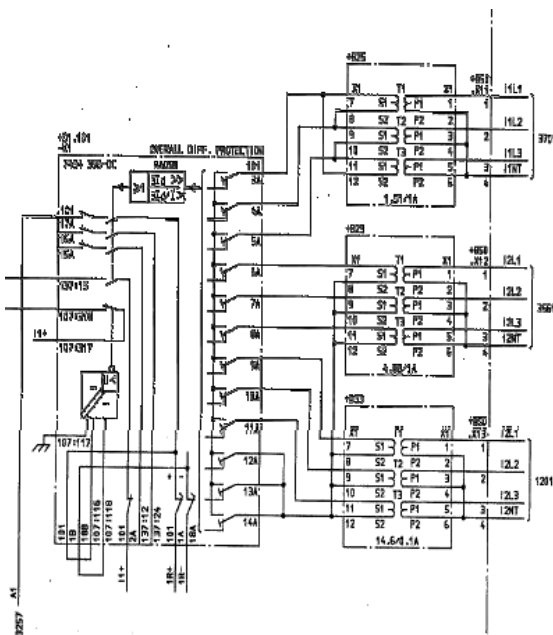
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan pada Relai diferensial tipe RADS B ASEA yang terpasang pada Unit 1 PLTA Panglima Besar Soedirman, PT Indonesia Power UP Mrica [22]. Proses pengujian dilakukan menggunakan universal relay test set and commissioning tool OMICRON CMC 356 yang terintegrasi dengan perangkat lunak bawaan, serta didukung oleh peralatan penunjang berupa kabel pengujian,

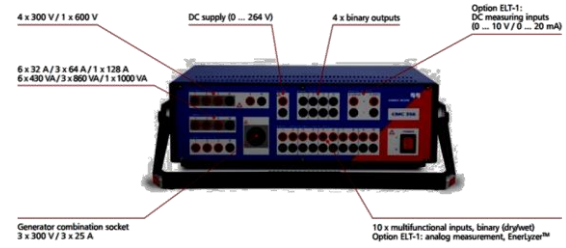
laptop, straight cable, serat optik, dan perangkat pendukung lainnya [23]. Data hasil pengujian dianalisis dan dibandingkan dengan spesifikasi serta standar pabrikan Relai diferensial untuk menentukan apakah kinerja Relai berada dalam kondisi normal atau menyimpang [24]. Alur pelaksanaan pengujian secara sistematis ditunjukkan pada Gambar 1 dalam bentuk diagram alir.



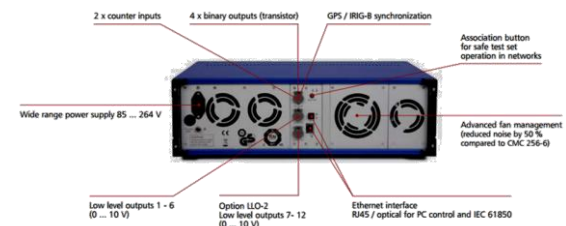
Gambar 3. Single Line Diagram Proteksi PLTA Panglima Besar Seedirman



Gambar 4. Diagram Rangkaian Relai Diferensial



Gambar 5. Tampilan OMICRON CMC 356 Tampak Depan



Gambar 6. Tampilan OMICRON CMC 356 Tampak Belakang

Untuk memastikan bahwa Relai diferensial RADSB ASEA masih berfungsi sesuai karakteristik rancangannya dan memenuhi standar pabrikan, diperlukan serangkaian pengujian yang terstruktur dan terukur. Pengujian ini bertujuan mengevaluasi sensitivitas, kecepatan respon, serta kemampuan selektivitas Relai dalam membedakan kondisi gangguan internal dan kondisi non-gangguan. Melalui pengujian berbasis secondary injection, kinerja Relai dianalisis secara kuantitatif dengan mensimulasikan berbagai kondisi operasi yang merepresentasikan keadaan nyata di sistem. Uraian berikut menyajikan hasil pengujian Relai diferensial sebagai representasi kinerja aktual Relai dalam melindungi generator.

4.1. Pengujian arus operasi Relai

Pada pengujian arus operasi, nilai setelan Relai ditetapkan pada nilai 350 mA. Mengacu pada standar pengujian yang ditetapkan oleh pabrikan ASEA, nilai hasil pengukuran yang diperoleh diharapkan dalam batas toleransi antara 315 mA hingga 385 mA pada seluruh proses pengujian. Standar inj manual teknis ASEA Relays SMA 2 RK 625-101E [24]. Selain standar pabrikan, tersedia pula data hasil Pengujian Komisioning yang dilakukan pada saat awal pemasangan peralatan. Kedua data tersebut digunakan sebagai acuan pembandingan dalam mengevaluasi hasil pengujian yang

dilakukan. Ringkasan hasil pengujian selanjutnya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 2. Instalasi Relai Diferensial RADSB Asea

Rangkain	Arus Setelan (mA)	Nilai Operasi (mA)			Keterangan
		Phase L1	Phase L2	Phase L3	
		315-385			ASEA Relays SMA 2 RK 625-101E
1	350	332	344	339	Pengujian Komisioning
2	350	332	343	338	
3	350	332	343	338	
1	350	323	334	325	Hasil Pengujian
2	350	320	336	324	
3	350	320	336	324	

4.2. Pengujian waktu operasi Relai

Pada standar acuan pabrik ditentukan lamanya waktu operasi antara 27 – 33 ms. Untuk pengujian dengan 1,5 x Is ; 2 x Is ; 2,5 x Is (Manual book ASEA Relays SMA 2; Page 30; RADSB, UG 03 5012E.), dengan Is adalah besarnya setting arus [24]. Selain itu juga disediakan data hasil Pengujian Komisioning yang telah dilakukan sebelumnya. Hasil pengujian tercantum pada tabel 2.

Tabel 3. Instalasi Relai Diferensial RADSB Asea

Arus Injeksi (A)	Waktu Operasi (mS)	Keterangan
	27 mS-33 mS	ASEA Relays SMA 2; Page 30; RADSB, UG 03-5012E
1,5 X Is	0.53	30,0
2 x Is	1.05	30,0
2.5 x Is	1.75	30,0
1.5 x Is	0.53	33
2 x Is	1.05	31
2.5 x Is	1.75	28

4.3. Pengujian restraint characteristic

Ketika terjadi gangguan internal, maka dengan cepat Relai diferensial akan mentripkan CB. Namun RADSB memiliki rangkaian

penahan (*restrains circuitry*) untuk arus diferensial yang disebabkan oleh gangguan eksternal, arus *inrush* atau tegangan lebih untuk mencegah beroperasinya Relai. Hasil pengujian tercantum pada tabel 3.

Tabel 4. Instalasi Relai Diferensial RADSB Asea

Rangkaian yang di Injeksi	Fasa	Arus Injeksi (A)	Arus Diferensial I (A)	ASEA Relays SMA 2; RADSB, RK 625-101E. page :5
1 - 2	R	1.5	0,790	0.65 - 0.95
		3.0	2,066	1.6 - 2.2
1 - 3	R	1.5	0,775	0.65 - 0.95
		3.0	2,081	1.6 - 2.2
1 - 2	S	1.5	0,762	0.65 - 0.95
		3.0	1,962	1.6 - 2.2
1 - 3	S	1.5	0,760	0.65 - 0.95
		3.0	1,983	1.6 - 2.2
1 - 2	T	1.5	0,757	0.65 - 0.95
		3.0	1,984	1.6 - 2.2
1 - 3	T	1.5	0,759	0.65 - 0.95
		3.0	2,000	1.6 - 2.2

Dalam standar acuan pabrik yang terdapat pada buku petunjuk *ASEA Relays SMA 2; RADSB, RK 625-101E.page :5*, telah ditentukan bahwa untuk *trough* sebesar 1,5 A maka Relai harus trip oleh arus diferensial sebesar antara 0,65-0,95 A. Sedangkan untuk *trough current* 3 A antara 1,6-2,2 A [24]. Dari data hasil pengujian dapat kita lihat bahwa hasilnya masih sesuai dengan standar. selanjutnya bila kita bandingkan dengan kurva karakteristik batasan penahan (*restrains*) terhadap gangguan eksternal seperti *pada* gambar 7.

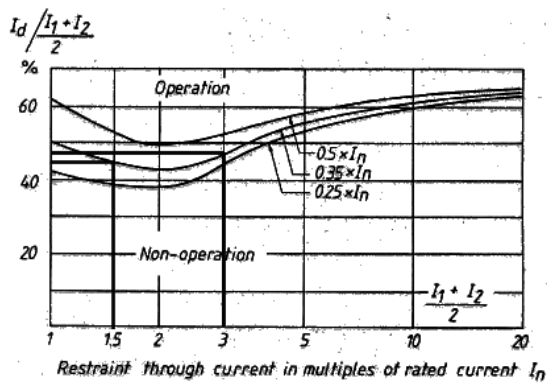
Untuk pengujian sirkit 1-2 pada fasa R. *Trough current* 1,5 A arus diferensialnya adalah 0,790 A, maka presentase perbandingannya adalah:

$$\frac{0,790}{1,5} \times 100\% = 52,67\%$$

Untuk kondisi through current sebesar 3 A diperoleh arus diferensial sebesar 2,066 A, sehingga persentasenya dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{2,066}{3} \times 100\% = 68,86\%$$

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa nilai arus diferensial yang terjadi berada di atas batas persentase kerja Relai yang ditetapkan. Dengan demikian, kondisi ini memenuhi kriteria operasi Relai sesuai karakteristik yang dirancang.



Gambar 7. Relai Diferensial RADSB ASEA

4.4. Pengujian second harmonic restraint relay

Pengujian ini dilaksanakan dengan menginjeksikan arus DC setengah gelombang sebesar 0,8 V ke dalam Relai, yang diparalelkan dengan arus injeksi pada Relai. Selanjutnya, arus injeksi AC dinaikkan secara bertahap mulai dari nol hingga Relai mengalami kondisi trip. Berdasarkan standar acuan pada buku manual ASEA Relays SMA.2 Appendix B RK 625-101E halaman 5 Tabel 2, Relai diharapkan bekerja (trip) pada saat arus AC yang diinjeksi berada pada rentang 1,2–1,8 A, yang merepresentasikan batas persentase harmonisa kedua sebesar 14–18% [24]. Hasil pengujian ini disajikan pada Tabel 4.

Hubungan antara persentase harmonisa kedua, komponen arus DC I_2 dan arus injeksi AC I_1 dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} & \text{percent 2nd harmonic} \\ &= \frac{0,472 \times I_2}{I_1 + 1,11 \times I_2} \times 100\% \end{aligned}$$

Hasil perhitungan berdasarkan persamaan tersebut dirangkum pada Tabel 5. Dari hasil analisis dapat diketahui bahwa Relai diferensial mulai bekerja ketika nilai harmonisa kedua berada pada rentang 14–18%, yang menunjukkan kesesuaian karakteristik kerja Relai dengan spesifikasi yang ditetapkan oleh pabrikan.

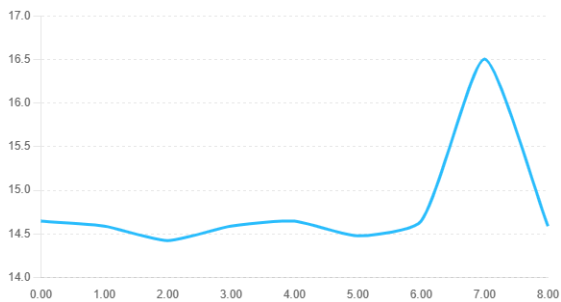
Tabel 5. Instalasi Relai Diferensial RADSB Asea

Rangkaian	Fasa	Arus	Arus
		Injeksi Dc 1 2 (A)	Injeksi AC 1 3 (A) 1.2-1.8
1	L1	0,80	1,690
	L2	0,80	1,70
	L3	0,80	1,73
2	L1	0,80	1,70
	L2	0,80	1,69
	L3	0,80	1,72
3	L1	0,80	1,69
	L2	0,80	1,40
	L3	0,80	1,70

Tabel 6. Instalasi Relai Diferensial RADSB Asea

I_2 (A)	I_1 (A)	Persentase Harmonisa Kedua
0,80	1,690	14,64701
0,80	1,70	14,59042
0,80	1,73	14,42322
0,80	1,70	14,59042
0,80	1,69	14,64701
0,80	1,72	14,47853
0,80	1,69	14,64701
0,80	1,40	16,5035
0,80	1,70	14,59042

Pengujian second harmonic restraint dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan relai diferensial dalam membedakan kondisi gangguan internal dengan fenomena transien seperti arus inrush pada generator arus transformator. Pengujian dilakukan dengan menginjeksikan arus DC setengah gelombang sebesar 0,80 A yang diparalelkan dengan arus injeksi AC pada relai. Variasi arus injeksi AC kemudian dinaikkan hingga relai mencapai kondisi operasi (trip). Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 6.



Gambar 8. Presentase Harmonisa Kedua

Berdasarkan data pada Tabel 6, nilai arus komponen DC (I_2) dijaga konstan sebesar 0,80 A, sedangkan arus injeksi AC (I_1) berada pada rentang 1,40 A hingga 1,73 A. Dari hasil perhitungan diperoleh persentase harmonisa kedua yang berkisar antara 14,42322% hingga 16,5035%. Nilai rata-rata persentase harmonisa kedua yang dihasilkan adalah sekitar 14,79%. Apabila dibandingkan dengan standar karakteristik relai diferensial yang ditetapkan oleh pabrikan, yaitu pada rentang 14%-18%, maka seluruh hasil pengujian masih berada dalam batas toleransi yang diizinkan. Hal ini menunjukkan bahwa relai diferensial tipe RADSB ASEA masih memiliki kemampuan yang baik dalam melakukan pengekangan terhadap komponen harmonisa kedua.

Hubungan antara arus injeksi AC dan persentase harmonisa kedua dapat diamati lebih jelas pada Gambar 8. Grafik tersebut menunjukkan bahwa nilai harmonisa kedua relatif stabil pada kisaran sekitar 14,4%-14,7% untuk sebagian besar titik pengujian. Peningkatan yang cukup signifikan terlihat pada titik pengujian ketika arus injeksi AC sebesar 1,40 A, dimana persentase harmonisa kedua mencapai 16,5035%. Kondisi ini terjadi karena nilai arus fundamental yang lebih kecil menyebabkan rasio antara komponen DC dan arus fundamental menjadi lebih besar.

Secara keseluruhan, pola grafik menunjukkan bahwa variasi arus injeksi AC tidak menyebabkan perubahan signifikan terhadap karakteristik harmonisa kedua relai. Stabilitas nilai harmonisa tersebut menunjukkan bahwa sistem pengekangan harmonisa pada relai diferensial masih bekerja sesuai dengan karakteristik desainnya. Dengan demikian, relai mampu mencegah terjadinya operasi yang tidak diinginkan (mal-operation) akibat arus inrush atau fenomena transien

lainnya, sekaligus tetap mempertahankan sensitivitas terhadap gangguan internal

5. KESIMPULAN

- Generator dan transformator merupakan peralatan vital pada pusat pembangkit tenaga listrik yang memerlukan sistem proteksi Andal untuk mencegah kerusakan akibat gangguan internal. Relai diferensial tipe ASEA RADSB digunakan sebagai proteksi utama pada peralatan tersebut dan memerlukan pemeliharaan serta pengujian secara berkala untuk memastikan kinerja yang optimal.
- Pengujian setting arus menunjukkan bahwa nilai arus pick-up Relai berada dalam rentang standar pabrikan. Dengan setting sebesar 350 mA dan rentang standar 315–385 mA, hasil pengujian menghasilkan nilai rata-rata arus pick-up sebesar 326,889 mA, yang masih berada dalam batas yang.
- Pengujian waktu operasi dilakukan dengan arus injeksi sebesar 0,53 A, 1,05 A, dan 1,75 A. Hasil pengujian menunjukkan waktu operasi rata-rata sebesar 30,667 ms, yang masih sesuai dengan standar pabrikan sebesar 27–33 ms, sehingga Relai memiliki respon yang cepat dan memenuhi persyaratan proteksi generator.
- Pengujian pengendalian karakteristik menunjukkan bahwa Relai mampu menahan gangguan eksternal di luar zona proteksi dan tetap responsif terhadap gangguan internal. Pada arus injeksi 1,5 A dan 3 A, hasil pengujian diferensial arus berada dalam rentang standar pabrikan, yaitu 0,65–0,95 A hingga 1,5 A dan 1,6–2,2 A hingga 3 A, sehingga karakteristik stabilitas Relai dinyatakan baik.
- Pengujian pengekangan harmonik kedua menunjukkan bahwa Relai mampu menahan pengaruh harmonisa kedua. Nilai persentase harmonisa kedua rata-rata sebesar 14,79084% masih berada dalam rentang standar pabrikan 14–18%, sehingga Relai-ansinya tidak sensitif terhadap kondisi non-gangguan seperti inrush atau fenomena transien tertentu.
- Berdasarkan seluruh hasil pengujian pengaturan arus, waktu operasi, karakteristik pengekangan, dan pengekangan harmonik kedua, Relai diferensial tipe ASEA RADSB dinyatakan

berada dalam kondisi normal dan layak dioperasikan sebagai sistem proteksi generator dan transformator pada pusat pembangkit tenaga listrik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ESDM, "Konsumsi Listrik Masyarakat Meningkat, Tahun 2023 Capai 1.285 kWh/Kapita."
- [2] I. C. Saragih, D. Hartama, and A. Wanto, "Prediksi Perkembangan Jumlah Pelanggan Listrik Menurut Pelanggan Area Menggunakan Algoritma Backpropagation," vol. 2, no. 1, pp. 48–54, 2020, doi: 10.47065/bits.v2i1.341.
- [3] G. Altama, M. Y. Mustar, R. Syahputra, and T. I. Prasetyo, "Evaluation of Differential Protection in a Main Power Transformer : A Case Study in PT Pertamina Geothermal Energy Area of Kamojang," vol. 3, no. 2, 2019, doi: <https://doi.org/10.18196/jet.3256>.
- [4] G. R. Iriando and A. Imam Agung, "Studi Koordinasi Sistem Proteksi pada Transformator 20kv Di Jaringan Distribusi 20 kV Penyulang Bandilan," 2019, doi: <https://doi.org/10.26740/jte.v8n3.p%25p>.
- [5] S. Hardi *et al.*, "Analisis Kerja Rele Overall Diferensial Pada Generator Dan Transformator PLTG Paya Pasir PT . PLN Persero," vol. 2, no. 2, pp. 58–65, 2020, doi: <https://doi.org/10.30596/rele.v1i1.4418>.
- [6] M. Raichura, N. Chothani, and D. Patel, "Improved Transformer Differential Protection by Adaptive Pickup Setting during Momentary Over-Fluxing Condition," pp. 180–189, 2020, doi: 10.15598/aece.v18i3.3833.
- [7] Firdaus, F. S, S. Kasim, and A. Imran, "Protection Relay Coordination Studies (Over Current Relays and Ground Fault Relays) On The Power Plant Electrical System , PT . Rekind Daya Mamuju By Using The ETAP 12 . 6 Program," vol. 7, no. 1, 2023, doi: 10.21070/jeeeu.v7i1.1651.
- [8] F. Gumilang, B. Purnomo, and I. T. Prakoso, "Analisis koordinasi sistem proteksi menggunakan software etap untuk meningkatkan keandalan jaringan distribusi listrik 20 kv pada perusahaan yang bergerak di bidang pengolahan makanan," vol. 7, no. 2, pp. 74–85, 2023, doi: 10.31000/jte.v7i2.9808.
- [9] M. A. Haidar and A. Sofwan, "Unjuk Kerja Rele Differensial pada Transformator 150/20 kV terhadap Gangguan Hubung Singkat dengan ETAP 12.6," vol. 12, no. 3, pp. 1–10, 2024, doi: <http://dx.doi.org/10.23960/jitet.v12i3S1.4914>.
- [10] jingde X. S. L. S. G. W. S. G. Song; and dan C. Chen, "Research on Differential Protection of Generator Based on New Braking Mode," 2021, doi: 10.3390/en14071857.
- [11] kim hung Le and P. H. Vu, "Performance Evaluation of a Generator Differential Protection Function for a Numerical Relay," vol. 9, no. 4, pp. 4342–4348, 2019, doi: 10.48084/etasr.2754.
- [12] A. Goeritno, I. Nugraha, S. Rasiman, and A. Johan, "Instrumentation Mesure Métrologie Injection Current into the Power Transformer as an Internal Fault Phenomena for Measuring the Differential Relay Performance," vol. 19, no. 6, pp. 443–451, 2020, doi: 10.18280/i2m.190605.
- [13] R. A. Mahmoud, "Experimental performance examination of a coherence technique-based numerical differential current relay for AC machine stator windings protection," pp. 1–28, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-89092-z.
- [14] N. Rohadi, N. Suhendi, and L. K. Men, "Teknik Pengujian Kinerja Algoritme Relay Jarak Menggunakan DIgSILENT (The Technique of Distance Relay Algorithm Performance Testing Using," vol. 10, no. 1, pp. 85–90, 2021, doi: 10.22146/jnteti.v10i1.735.
- [15] N. S. Mardiana, R. Y. Cahyani, Y. B. Debytantana, and S. Sujito, "Electrical Protection Systems in Indonesia : Literature Review of Relay on Indonesian Articles Perspectives," vol. 2, no. 1, 2024, doi: 10.59535/jece.v2i1.282.
- [16] N. B. Dharmawan, W. G. Ariastina, and A. A. N. Amrita, "STUDI SISTEM PROTEKSI LINE CURRENT DIFFERENTIAL RELAY PADA SALURAN TRANSMISI 150 KV," vol. 7, no. 1, pp. 152–161, 2020, doi: 10.24843/spektrum.2020.v07.i01.p22.
- [17] A. Frediansyah, M. Facta, D. T. Elektro, and U. Diponegoro, "Koordinasi Proteksi Relai Arus Lebih pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan Perambatan Balik," pp. 7–13, 2022, doi: 10.26623/elektrika.v14i1.4474.
- [18] M. Mizwar and R. Adriman, "Sympathetic Trip Analysis in Distribution System of PLTU and PLTA Nagan Raya," vol. 8, no. 1, pp. 1–3, 2024, doi: 10.22373/crc.v8i1.19791.
- [19] L. K. Hung, V. P. Huan, and T. Company, "Performance Analysis and Assessment of A Transformer Different Protection Relay

- SEL387 at 110kV Lang Co Substation,” pp. 8–12.
- [20] A. A. Hameed, A. J. Sultan, and M. F. Booneya, “Design and Implementation of Multifunction Relay Based on Microcontroller,” vol. 3, no. 3, pp. 31–43, 2021, doi: 10.51173/jt.v3i3.353.
- [21] D. E. Kusuma, “Perbandingan Setting Matematis Rele Diferensial Transformator Daya dengan Setting GI 150KV Cilegon Baru PT . PLN (Persero) ULTG Cilegon,” vol. 2, no. 2, pp. 24–38, 2023.
- [22] ABB, *Transformer differential protection RADSB User ' s Guide Transformer differential protection RADSB*.
- [23] Omicron, *Cmc 356*.
- [24] ASEA, *Manual book ASEA Relays SMA 2. RADSB*.
- [25] Indonesia Power, “MRICA HEPP (Indonesia Power – Generation Business Unit).”