

ANALISA PROTEKSI RELAI JARAK PADA SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI 150 KV GARDU INDUK KERAMASAN KE GARDU INDUK SIMPANG TIGA

Ismail¹, Abdul Azis^{2*}, Emidiana³

1,2,3 Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas PGRI Palembang, Indonesia

*e-mail: azis@univpgri-palembang.ac.id

ABSTRAK

Proteksi relai jarak merupakan salah satu metode proteksi utama yang digunakan pada Saluran Udara Tegangan Tinggi untuk mendeteksi, melokalisasi, dan memutus gangguan yang terjadi pada saluran transmisi berdasarkan pengukuran impedansi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja proteksi relai jarak pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV yang menghubungkan Gardu Induk Keramasan dan Gardu Induk Simpang Tiga. Fokus penelitian adalah mengevaluasi nilai jangkauan impedansi dan waktu tunda pada setiap zona proteksi, serta membandingkan pengaturan eksisting dengan hasil perhitungan berdasarkan parameter impedansi saluran. Data yang diperoleh menunjukkan bahwa pada Zona 1, nilai jangkauan impedansi eksisting sebesar 5,05 Ω sesuai dengan hasil perhitungan 5,0495 Ω , dan relai bekerja secara seketika tanpa penundaan waktu 0 detik, sesuai dengan fungsi proteksi untuk area terdekat. Pada Zona 2, jangkauan impedansi eksisting sebesar 7,58 Ω juga sangat mendekati hasil perhitungan sebesar 7,5743 Ω , dengan waktu operasi 0,4 detik pada kedua pengaturan. Hal ini menunjukkan bahwa proteksi pada Zona 1 dan Zona 2 sudah optimal dalam menangani gangguan dengan waktu tunda yang tepat. Namun, pada Zona 3, terdapat perbedaan antara jangkauan impedansi eksisting sebesar 13,76 Ω dan hasil perhitungan sebesar 15,1485 Ω . Selain itu, waktu tunda eksisting sebesar 1,2 detik lebih singkat dibandingkan hasil perhitungan sebesar 1,6 detik. Secara keseluruhan, pengaturan eksisting telah mendekati hasil perhitungan pada Zona 1 dan Zona 2, namun pada Zona 3 diperlukan peninjauan lebih lanjut untuk memastikan proteksi optimal terhadap gangguan.

Kata Kunci: Proteksi, Relai Jarak, Impedansi, SUTT

Analysis of Distance Relay Protection on 150 kV High Voltage Overhead Lines Keramasan Substation to Simpang Tiga Substation

ABSTRACT

Distance relay protection is one of the main protection methods used on High Voltage Overhead Lines to detect, localise, and disconnect disturbances that occur on transmission lines based on impedance measurements. This study aims to analyse the performance of distance relay protection on the 150 kV High Voltage Overhead Lines connecting Keramasan Substation and Simpang Tiga Substation. The focus of the research is to evaluate the value of impedance range and delay time in each protection zone, and compare the existing settings with the calculation results based on the line impedance parameters. The data obtained shows that in Zone 1, the existing impedance coverage value of 5.05 Ω corresponds to the calculation result of 5.0495 Ω , and the relay works instantly without a time delay of 0 seconds, in accordance with the protection function for the immediate area. In Zone 2, the existing impedance range of 7.58 Ω is also very close to the calculated result of 7.5743 Ω , with an operating time of 0.4 seconds in both settings. This shows that the protection in Zone 1 and Zone 2 is optimal in handling faults with the right delay time. However, in Zone 3, there is a difference between the existing impedance range of 13.76 Ω and the calculation result of 15.1485 Ω . In addition, the existing delay time of 1.2 seconds is shorter than the calculated result of 1.6 seconds. Overall, the existing settings are close to the calculated results in Zone 1 and Zone 2, but Zone 3 requires further review to ensure optimal protection against faults.

Keywords: Protection, Distance Relay, Impedance, SUTT

I. PENDAHULUAN

Dalam sistem kelistrikan, jaringan transmisi berfungsi sebagai penghubung antara pusat pembangkit tenaga listrik dengan pusat-pusat beban. Jaringan transmisi pada tegangan tinggi seperti Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 150 kV memainkan peran penting dalam menyalurkan daya listrik dalam jumlah besar dengan kerugian daya yang minimal. Keandalan penyaluran listrik sangat bergantung pada efektivitas sistem proteksi yang diterapkan di jaringan tersebut [1-4].

Salah satu bentuk proteksi yang umum digunakan pada SUTT adalah proteksi relai jarak (distance relay). Relai jarak bekerja dengan mendeteksi gangguan yang terjadi di saluran transmisi melalui pengukuran impedansi, yaitu perbandingan antara tegangan dan arus. Saat terjadi gangguan, impedansi saluran menurun drastis, sehingga relai jarak dapat mendeteksi dan memutuskan bagian saluran yang terganggu untuk mencegah kerusakan lebih lanjut serta meminimalisir area yang terdampak gangguan [5-7].

Saluran transmisi 150 kV dari Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga merupakan salah satu jalur penting dalam sistem kelistrikan di wilayah Sumatera Selatan. Mengingat peran kritis dari jalur ini, sistem proteksi yang diterapkan harus memiliki keandalan tinggi untuk mendeteksi dan menangani gangguan secara cepat dan tepat. Proteksi relai jarak pada saluran ini dirancang untuk membagi saluran menjadi beberapa zona proteksi berdasarkan jarak dari gardu induk. Setiap zona memiliki karakteristik dan waktu tunda yang berbeda, sesuai dengan kedekatan gangguan terhadap gardu induk.

Meskipun proteksi relai jarak pada SUTT 150 kV ini telah diterapkan, evaluasi mendalam terhadap kinerja proteksi masih perlu dilakukan. Variasi beban, panjang saluran, dan jenis gangguan seperti hubung singkat antar fasa atau hubung singkat fasa ke tanah dapat memengaruhi sensitivitas dan keakuratan sistem proteksi. Selain itu, dengan adanya perkembangan teknologi dan standar baru dalam sistem proteksi, penting untuk melakukan pembaruan analisis proteksi relai agar sesuai dengan kondisi dan kebutuhan sistem kelistrikan saat ini.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis proteksi relai jarak pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV dari Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga. Fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja relai jarak pada setiap zona proteksi, baik dari segi jangkauan impedansi maupun waktu operasi relai, serta memberikan rekomendasi terhadap kemungkinan perbaikan dan optimalisasi sistem proteksi yang ada. Dengan adanya analisis ini, diharapkan dapat ditemukan cara untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi sehingga gangguan pada saluran transmisi dapat diminimalisir, dan penyaluran daya listrik dapat berjalan dengan lebih efisien dan aman.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian adalah PT PLN (Persero) Unit Induk Penyaluran dan Pusat Pengatur Beban (UIP3B) Sumatera Unit Pelayanan Transmisi (UPT) Palembang Unit Layanan Transmisi dan Gardu Induk (ULTG) Keramasan Palembang dan Gardu Induk Simpang Tiga Indralaya. Objek penelitian adalah Relai Jarak pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV dari Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga. Pelaksanaan penelitian dimulai dari bulan Februari 2024 sampai dengan bulan Maret 2024.



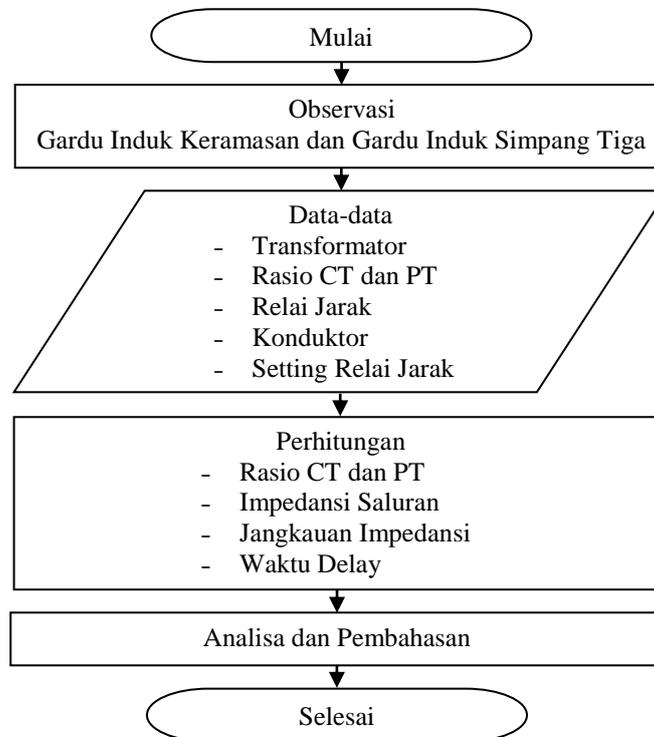
Gardu Induk Keramasan

Gardu Induk Simpang Tiga

Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.2. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilaksanakan berdasarkan Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari Gardu Induk Keramasan dan Gardu Induk Simpang Tiga yaitu data transformator, Rasio CT dan PT, Relai Jarak, Konduktor, dan Setting Relai Jarak. Selanjutnya, data yang telah dikumpulkan dianalisis agar dapat digunakan dalam tahapan penelitian sebagai berikut:

1. Rasio CT dan PT

Nilai rasio Current Transformator (CT) dan Potential Transformator (PT) dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut [8]:

$$n_1 = \frac{CT}{PT} \quad (1)$$

Keterangan:

- n_1 = Rasio CT dan PT
- CT = Rasio Current Transformator
- PT = Rasio Potential Transformator

2. Impedansi Saluran

Nilai impedansi pada saluran udara tegangan tinggi dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut [7]:

$$Z_{L_{11}} = Z_{L_{11}} L_1 \tag{2}$$

$$Z_{L_{21}} = Z_{L_{21}} L_2 \tag{3}$$

Keterangan:

- $Z_{L_{11}}$ = Impedansi saluran pertama urutan positif (Ω)
- $Z_{L_{11}}$ = Impedansi saluran pertama urutan positif (Ω/km)
- L_1 = Panjang saluran pertama (km)
- Z_{L_2} = Impedansi saluran kedua urutan positif (Ω)
- $Z_{L_{21}}$ = Impedansi saluran kedua urutan positif (Ω/km)
- L_2 = Panjang saluran kedua (km)

3. Jangkauan Impedansi

a. Penyetelan Zona 1

Zona 1 mengamankan sejauh mungkin daerah saluran udara tegangan tinggi didepannya yang dilindungi, relai diatur 80% dari panjang saluran dengan mempertimbangkan kesalahan data saluran sebesar 20%, sehingga didapatkan persamaan matematis untuk Zona 1 pada sisi primer adalah [9]:

$$Z_{1P} = 0,8 Z_{L_{11}} \tag{4}$$

Jangkauan impedansi Zona 1 pada sisi sekunder dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut [9]:

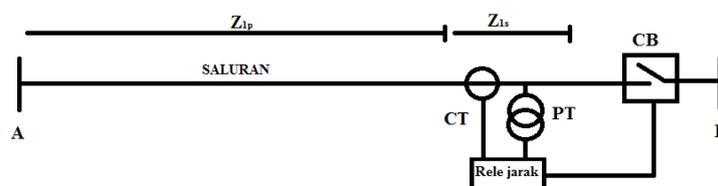
$$Z_{1S} = n_1 Z_{1P} \tag{5}$$

Waktu aktif relai Zona 1 adalah $t = 0$ detik.

Keterangan:

- Z_{1P} = Impedansi Zona 1 sisi primer (Ω)
- Z_{1S} = Impedansi Zona 1 sisi sekunder (Ω)

Pada Gambar 3 dapat dilihat contoh single line diagram jangkauan impedansi pada sisi primer dan sekunder pada Zona 1 [10].



Gambar 3. Jangkauan impedansi pada sisi primer dan sekunder pada Zona 1

b. Penyetelan Zona 2

Jangkauan Zona 2 harus mencakup hingga busbar didepannya namun tidak boleh overlap dengan Zona 2 relai jarak di seksi berikutnya. Dengan mengasumsikan kesalahan-kesalahan seperti pada penyetingan Zona 1 sekitar 20%, maka didapat penyetingan minimum dan maksimum untuk Zona 2 sebagai berikut [7]:

$$Z_{2min} = 1,2 Z_{L11} \tag{6}$$

$$Z_{2maks} = 0,8 (Z_{L11} + 0,8 Z_{L21}) \tag{7}$$

Waktu aktif relai zona 2 adalah $t = 0,4$ sampai $0,8$ detik.

Jangkauan impedansi Zona 2 pada sisi primer dan sekunder dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut [7]:

$$Z_{2P} = Z_{2min} \tag{8}$$

$$Z_{2S} = n_1 Z_{2P} \tag{9}$$

Keterangan:

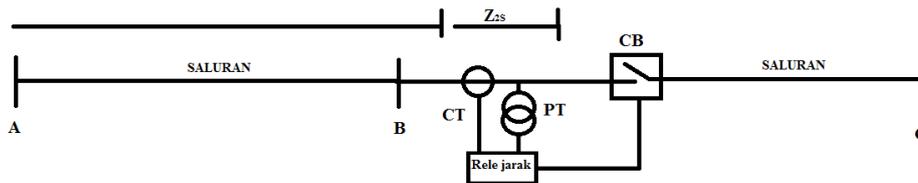
Z_{2min} = Impedansi minimum Zona 2 (Ω)

Z_{2maks} = Impedansi maksimum Zona 2 (Ω)

Z_{2P} = Impedansi Zona 2 sisi primer (Ω)

Z_{2S} = Impedansi Zona 2 sisi sekunder (Ω)

Pada Gambar 4 dapat dilihat contoh single line diagram jangkauan impedansi pada sisi primer dan sekunder pada Zona 2 [10].



Gambar 4. Jangkauan impedansi pada sisi primer dan sekunder pada Zona 2

c. Penyetelan Zona 3

Zona 3 mengamankan sisa daerah yang tidak dilindungi oleh Zona 2 dan minimal sampai akhir seksi berikutnya, sehingga didapatkan persamaan untuk Zona 3 sebagai berikut [6]:

$$Z_{3min} = 1,2 (Z_{L11} + Z_{L21}) \tag{10}$$

$$Z_{3maks} = 0,8 (Z_{L11} + 1,2 Z_{L21}) \tag{11}$$

Jangkauan impedansi Zona 3 pada sisi primer dan sekunder dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut [6]:

$$Z_{3P} = Z_{3min} \tag{12}$$

$$Z_{3S} = n_1 Z_{3P} \tag{13}$$

Keterangan:

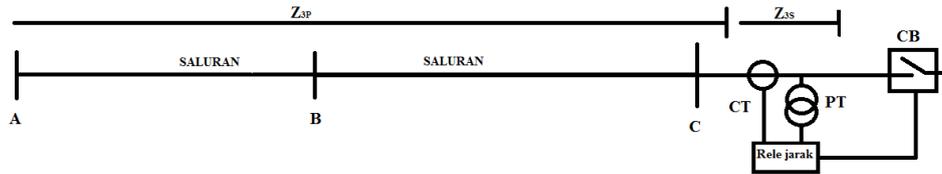
Z_{3min} = Impedansi minimum Zona 3 (Ω)

Z_{3maks} = Impedansi maksimum Zona 3 (Ω)

Z_{3P} = Impedansi Zona 3 sisi primer (Ω)

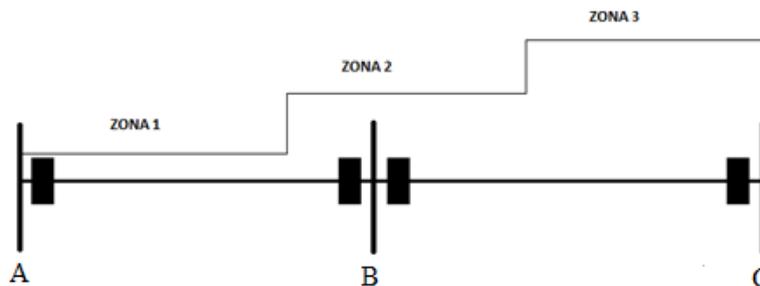
Z_{3S} = Impedansi Zona 3 sisi sekunder (Ω)

Pada Gambar 5 dapat dilihat contoh single line diagram jangkauan impedansi pada sisi primer dan sekunder pada Zona 3 [10].



Gambar 5. Jangkauan impedansi pada sisi primer dan sekunder pada Zona 3

Contoh zona pengamanan dari relai jarak dapat dilihat pada Gambar 6 dibawah ini [10].



Gambar 6. Zona pengamanan relai jarak

4. Waktu Delay

Relé jarak akan mendeteksi gangguan pada saluran udara tegangan tinggi sesuai dengan jarak gangguan yang terjadi [11].

a. Delay Zona 1

Pada Zona 1 merupakan pengamanan utama sehingga waktu kerja relai jarak adalah seketika tanpa perlambatan waktu, dan tidak dilakukan penyetingan waktu dengan waktu kerja relai seketika yaitu:

$$T_1 = 0 \text{ detik}$$

b. Delay Zona 2

Zona 2 merupakan pengamanan cadangan untuk Zona 1 sesi berikutnya tetapi tidak boleh tumpang tindih dengan Zona 2 sesi berikutnya dengan waktu (time actual) sekitar 0,4 detik sampai dengan 0,8 detik. Setelan (setting) waktu Zona 2 ditentukan berdasarkan:

$$T_2 = 0,4 \text{ detik jika } Z_{2maks} - Z_{L11} < 0,8 Z_{L21}$$

$$T_2 = 0,8 \text{ detik jika } Z_{2maks} - Z_{L11} > 0,8 Z_{L21}$$

c. Delay Zona 3

Zona 3 merupakan pengamanan cadangan (backup protection) untuk Zona 2 sesi berikutnya tetapi tidak boleh tumpang tindih (overlap) dengan Zona 3 sesi berikutnya. Pada Zona 3 memiliki setting waktu sebagai berikut:

$$T_3 = 1,2 \text{ detik jika } Z_{3maks} > Z_{3min}$$

$$T_3 = 1,6 \text{ detik jika } Z_{3maks} < Z_{3min}$$

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Penelitian

1. Data Transformator

Data Transformator Daya 60 MVA di Gardu Induk Keramasan adalah sebagai berikut:

- Serial Number : 3011070009
- Year of : 2008
- Manufacture Standard : IEC 60076
- Rated Power : 42/60 MVA
- Tegangan : 150 kV / 20 kV
- Cooling : ONAN/ONAF-70/100%
- Frequency : 50 Hz
- Phasses : 3
- Connection Syimbol : YNyn0(d1)
- Tap Changer : MR MS III 300Y-72.5KV+ED100S
- Max Altitude : 1000 m
- Type Oil : NYNAS NITRO LIBRA
- Tingkat Isolasi Dasar : 650 kV

2. Data Rasio Current Transformator dan Potential Transformator

Data Rasio Current Transformator (CT) dan Potential Transformator (PT) pada Gardu Induk Simpang Tiga adalah sebagai berikut:

$$CT = 1.600 / 5 A$$

$$PT = 150 kV / 0,1 kV = 150.000 V / 100 V$$

3. Data Relai Jarak

- Merk : ALSTOM
- Tipe : MICOM P443
- No.Seri : 33899919/11/16
- Arus nominal : 1 A
- Tegangan nominal : 100 V
- Tegangan DC : 110 V
- Frekuensi : 50/60 Hz

4. Data Konduktor

Data konduktor pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga 1 adalah sebagai berikut:

- Jumlah konduktor per fase : 2 (*Twin Conductor*)
- Jenis/tipe konduktor : ACSR (Hawk)
- Jumlah strand : 21 Al + 7 St
- Luas penampang terhitung : 281 mm²
- Diameter kawat konduktor : 21,8 mm = 0,0218 m
- Jari-jari kawat konduktor : 10,9 mm = 0,0109 m
- Jarak antar konduktor berkas : 40 cm = 0,4 m
- Kemampuan Hantar Arus : 1.400 A
- Panjang saluran : 22,66 km
- Impedansi urutan positif : 0,05497 + j 0,27307 Ω/km
- Impedansi urutan negatif : 0,05497 + j 0,27307 Ω/km
- Impedansi urutan nol : 0,50452 + j 1,53550 Ω/km

Data konduktor pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Simpang Tiga 1 ke Gardu Induk Keramasan 2 adalah sebagai berikut:

- Jumlah konduktor per fase : 2 (*Twin Conductor*)
- Jenis/tipe konduktor : ACSR (Hawk)

- Jumlah strand : 21 Al + 7 St
- Luas penampang terhitung : 281 mm²
- Diameter kawat konduktor : 21,8 mm = 0,0218 m
- Jari-jari kawat konduktor : 10,9 mm = 0,0109 m
- Jarak antar konduktor berkas : 40 cm = 0,4 m
- Kemampuan Hantar Arus : 1.400 A
- Panjang saluran : 22,66 km
- Impedansi urutan positif : 0,05497 + j 0,27307 Ω/km
- Impedansi urutan negatif : 0,05497 + j 0,27307 Ω/km
- Impedansi urutan nol : 0,50452 + j 1,53550 Ω/km

5. Data Setting Relai Jarak

Data Setting Relai Jarak Saluran Udara Tegangan Tinggi Keramasan - Simpang Tiga dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Setting Relai Jarak

No	Bay Transmisi	Setting Zona 1 (Ω)	Setting Zona 2 (Ω)	Setting Zona 3 (Ω)
		0 detik	0.4 detik	1,2-1,4 detik
1	L1KRSAN-SPTGA 1	5,05	7,58	13,76
2	L2 SPTGA 1-KRSAN	5,05	7,58	12,12

Sumber: Gardu Induk Keramasan, 2024

4.2. Hasil

1. Rasio CT dan PT

Nilai rasio Current Transformator (CT) dan Potential Transformator (PT) dapat ditentukan dengan persamaan (1) sebagai berikut:

$$n_1 = \frac{CT}{PT} = \frac{1.600 / 1}{150.000 / 100} = 0,2133$$

2. Impedansi Saluran



Gambar 7. SUTT 150 kV Gardu Induk Keramasan - Gardu Induk Simpang Tiga 1 - Gardu Induk Keramasan 2

Nilai impedansi urutan positif pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga 1 dapat ditentukan dengan persamaan (2):

$$Z_{L_{11}} = Z_{L_{11}} L_1 = (0,05497 + j 0,27307) \times 22,66 = 1,24562 + j 6,18777$$

$$= \sqrt{39,8400} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 6,3119 \angle 78,6183^\circ \Omega$$

Nilai impedansi urutan positif pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Simpang Tiga 1 ke Gardu Induk Keramasan 2 dapat ditentukan dengan persamaan (3):

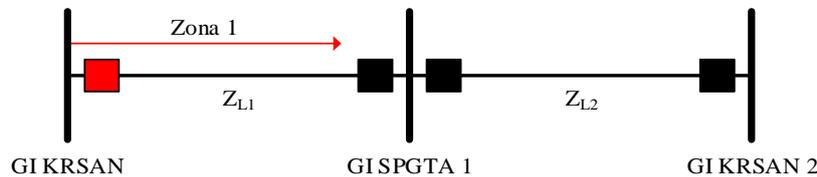
$$Z_{L_{21}} = Z_{L_{21}} L_2 = (0,05497 + j 0,27307) \times 22,66 = 1,24562 + j 6,18777$$

$$= \sqrt{39,8400} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 6,3119 \angle 78,6183^\circ \Omega$$

3. Jangkauan Impedansi

a. Zona 1

Jangkauan impedansi Zona 1 pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Jangkauan Impedansi Zona 1 SUTT 150 kV Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga

Jangkauan impedansi Zona 1 pada sisi primer dapat ditentukan dengan persamaan (4):

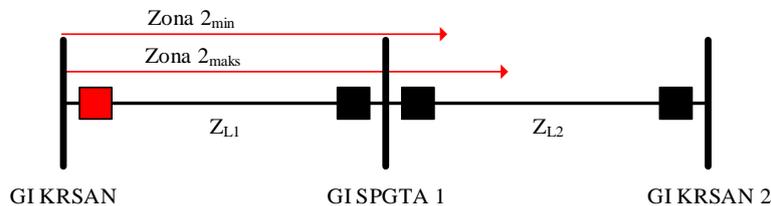
$$\begin{aligned} Z_{1P} &= 0,8 Z_{L11} = 0,8 \times (1,24562 + j 6,18777) = 0,99650 + j 4,95021 \\ &= \sqrt{25,4976} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 5,0495 \angle 78,6183^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jangkauan impedansi Zona 1 pada sisi sekunder dapat ditentukan dengan persamaan (5):

$$\begin{aligned} Z_{1S} &= n_1 Z_{1P} = 0,2133 \times (0,99650 + j 4,95021) = 0,21259 + j 1,05605 \\ &= \sqrt{1,16042} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 1,0772 \angle 78,6183^\circ \Omega \end{aligned}$$

b. Zona 2

Jangkauan impedansi Zona 1 pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Jangkauan Impedansi Zona 2 SUTT 150 kV Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga

Jangkauan impedansi Zona 2 minimum dapat ditentukan dengan persamaan (6):

$$\begin{aligned} Z_{2min} &= 1,2 Z_{L11} = 1,2 \times (1,24562 + j 6,18777) = 1,49474 + j 7,42532 \\ &= \sqrt{57,3696} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 7,5743 \angle 78,6183^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jangkauan impedansi Zona 2 maksimum dapat ditentukan dengan persamaan (7):

$$\begin{aligned} Z_{2maks} &= 0,8 (Z_{L11} + 0,8 Z_{L21}) \\ &= 0,8 \times (1,24562 + j 6,18777 + 0,8 \times 1,24562 + j 6,18777) \\ &= 0,8 \times (2,24212 + j 11,13800) = 1,79369 + j 8,91038 \\ &= \sqrt{82,6123} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 9,0891 \angle 78,6183^\circ \Omega \end{aligned}$$

Jangkauan impedansi Zona 2 pada sisi primer dapat ditentukan dengan persamaan (8):

$$\begin{aligned} Z_{2P} &= Z_{2min} = 1,49474 + j 7,42532 \Omega \\ &= \sqrt{57,3696} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 7,5743 \angle 78,6183^\circ \Omega \end{aligned}$$

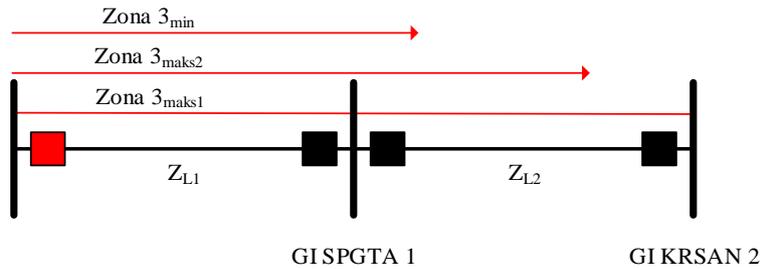
Jangkauan impedansi Zona 2 pada sisi sekunder dapat ditentukan dengan persamaan (9):

$$Z_{2S} = n_1 Z_{2P} = 0,2133 \times (1,49474 + j 7,42532)$$

$$= 0,31888 + j 1,58407 = \sqrt{2,61096} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 1,6158 \angle 78,6183^\circ \Omega$$

c. Zona 3

Jangkauan impedansi Zona 1 pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150 kV Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Jangkauan Impedansi Zona 3 SUTT 150 kV Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Simpang Tiga

Jangkauan impedansi Zona 3 minimum dapat ditentukan dengan persamaan (10):

$$Z_{3min} = 1,2 (Z_{L_{11}} + Z_{L_{21}}) = 1,2 \times (1,24562 + j 6,18777 + 1,24562 + j 6,18777)$$

$$= 1,2 \times (2,49124 + j 12,3755) = 2,98949 + j 14,8506$$

$$= \sqrt{229,479} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 15,1485 \angle 78,6183^\circ \Omega$$

Jangkauan impedansi Zona 3 maksimum dapat ditentukan dengan persamaan (11):

$$Z_{3maks} = 0,8 (Z_{L_{11}} + 1,2 Z_{L_{21}})$$

$$= 0,8 \times (1,24562 + j 6,18777 + 1,2 \times 1,24562 + j 6,18777)$$

$$= 0,8 \times (2,74036 + j 13,6131) = 2,19229 + j 10,8905$$

$$= \sqrt{123,4080} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 11,1089 \angle 78,6183^\circ \Omega$$

Jangkauan impedansi Zona 3 pada sisi primer dapat ditentukan dengan persamaan (12):

$$Z_{3P} = Z_{3min} = 2,98949 + j 14,8506$$

$$= \sqrt{229,4790} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 15,1485 \angle 78,6183^\circ \Omega$$

Jangkauan impedansi Zona 3 pada sisi sekunder dapat ditentukan dengan persamaan (13):

$$Z_{3S} = n_1 Z_{3P} = 0,2133 \times (2,98949 + j 14,8506)$$

$$= 0,63776 + j 3,16814 = \sqrt{10,4438} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 3,2317 \angle 78,6183^\circ \Omega$$

4. Waktu Delay

Relai jarak akan mendeteksi gangguan sesuai dengan jarak gangguan yang terjadi.

a. Delay Zona 1

Jika gangguan terjadi di daerah Zona 1 maka relai akan bekerja instant (seketika):

$$T_1 = 0 \text{ detik}$$

b. Delay Zona 2

Jika gangguan terjadi di daerah Zona 2 maka relai akan bekerja dengan ketentuan:

$$T_2 = 0,4 \text{ detik jika } Z_{2maks} - Z_{L_{11}} < 0,8 Z_{L_{21}}$$

$$T_2 = 0,8 \text{ detik jika } Z_{2maks} - Z_{L_{11}} > 0,8 Z_{L_{21}}$$

Dimana:

$$\begin{aligned} Z_{2maks} - Z_{L_{11}} &= (1,79369 + j 8,91038) - (1,24562 + j 6,18777) \\ &= 0,54807 + j 2,72262 = \sqrt{7,71303} \angle \tan^{-1}(4,96762) \\ &= 2,7772 \angle 78,6183^\circ \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0,8 Z_{L_{21}} &= 0,8 \times (1,24562 + j 6,18777) = 0,99650 + j 4,95021 \\ &= \sqrt{25,4976} \angle \tan^{-1}(4,96762) = 5,0495 \angle 78,6183^\circ \Omega \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan $Z_{2maks} - Z_{L_{11}} < 0,8 Z_{L_{21}}$ sehingga berdasarkan ketentuan waktu delay dipilih $T_2 = 0,4$ detik.

c. Delay Zona 3

Jika gangguan terjadi di daerah Zona 3 maka relai akan bekerja dengan ketentuan:

$$\begin{aligned} T_3 &= 1,2 \text{ detik jika } Z_{3maks} > Z_{3min} \\ T_3 &= 1,6 \text{ detik jika } Z_{3maks} < Z_{3min} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan $Z_{3maks} = 11,1089 \angle 78,6183^\circ \Omega$ dan $Z_{3min} = 15,1485 \angle 78,6183^\circ \Omega$, maka $Z_{3maks} < Z_{3min}$ sehingga berdasarkan ketentuan waktu delay dipilih $T_3 = 1,6$ detik.

4.3. Pembahasan

Tabel 2. Perbandingan Nilai Setting Relai Jarak Pada SUTT 150 kV Gardu Induk Keragaman ke Gardu Induk Simpang Tiga 1

Jangkauan Impedansi	Eksisting		Perhitungan	
	Impedansi (Ω)	Waktu (detik)	Impedansi (Ω)	Waktu (detik)
Zona 1	5,05	0	5,0495	0
Zona 2	7,58	0,4	7,5743	0,4
Zona 3	13,76	1,2	15,1485	1,6

- Pada Zona 1, relai dirancang untuk melindungi area yang paling dekat dengan gardu induk, yaitu sekitar 80-90% dari panjang total saluran. Berdasarkan tabel, nilai setting impedansi eksisting adalah 5,05 Ω , yang mendekati hasil perhitungan 5,0495 Ω . Kedua nilai ini hampir identik, menunjukkan bahwa setting eksisting telah cukup akurat dalam mencakup area terdekat dari saluran. Waktu operasi untuk Zona 1 adalah 0 detik, baik pada setting eksisting maupun hasil perhitungan, sesuai dengan prinsip proteksi Zona 1 yang bekerja seketika tanpa penundaan saat gangguan terdeteksi. Proteksi Zona 1 dirancang untuk memberikan respons yang cepat dan langsung, waktu operasi yang ditetapkan untuk Zona 1 adalah 0 detik pada pengaturan eksisting maupun hasil perhitungan. Ini berarti bahwa relai bekerja secara seketika tanpa adanya waktu tunda ketika mendeteksi gangguan di area ini. Respons seketika ini sangat penting untuk mencegah kerusakan yang lebih besar dan meminimalkan dampak gangguan pada jaringan transmisi, khususnya pada area yang paling dekat dengan gardu induk. Proteksi pada Zona 1 sudah optimal, dengan pengaturan eksisting yang sejalan dengan hasil perhitungan, memastikan respons yang cepat dan akurat terhadap gangguan di area terdekat gardu induk.

- Pada Zona 2, proteksi relai mencakup area yang lebih jauh dari gardu induk, biasanya antara 120-150% dari panjang total saluran transmisi. Proteksi ini tidak hanya mencakup bagian utama dari saluran, tetapi juga sebagian dari saluran yang lebih jauh. Nilai impedansi eksisting sebesar $7,58 \Omega$ jika dibandingkan dengan hasil perhitungan sebesar $7,5743 \Omega$ menunjukkan bahwa pengaturan eksisting sudah sangat mendekati hasil perhitungan. Perbedaan antara kedua nilai ini karena adanya faktor-faktor seperti toleransi pengaturan peralatan, perbedaan kondisi operasional, dan variasi lingkungan yang dapat mempengaruhi hasil. Waktu operasi yang ditetapkan untuk Zona 2 pada pengaturan eksisting adalah 0,4 detik, yang sama dengan waktu yang dihasilkan dari perhitungan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan eksisting sudah cukup baik dalam hal memberikan waktu tunda yang tepat untuk mengidentifikasi gangguan. Waktu tunda yang ditetapkan ini memastikan bahwa relai hanya bekerja setelah verifikasi tambahan, sehingga gangguan dapat dideteksi secara tepat dan pemutusan jaringan dilakukan tanpa mengganggu saluran yang tidak mengalami gangguan. Dengan demikian, sistem proteksi pada Zona 2 telah diatur dengan baik untuk memberikan respons yang optimal terhadap potensi gangguan, sekaligus menjaga kontinuitas penyaluran daya yang aman. Pengaturan eksisting pada Zona 2 telah sesuai dan dapat memberikan tingkat proteksi yang memadai, memastikan deteksi gangguan yang akurat tanpa memutus saluran secara tidak perlu, serta menghindari terjadinya pemadaman listrik yang meluas.
- Pada Zona 3, proteksi mencakup seluruh panjang saluran transmisi serta area cadangan yang lebih jauh dari titik gangguan. Nilai impedansi eksisting tercatat sebesar $13,76 \Omega$, sementara hasil perhitungan menunjukkan nilai yang lebih besar, yaitu $15,1485 \Omega$. Perbedaan ini cukup signifikan dan menunjukkan bahwa pengaturan eksisting mungkin belum optimal dalam mencakup seluruh area proteksi, terutama yang lebih jauh dari gardu induk. Perbedaan ini bisa terjadi akibat perbedaan asumsi atau pendekatan dalam perhitungan yang dirancang untuk memberikan cakupan proteksi yang lebih luas. Selain itu, waktu operasi relai pada Zona 3 dalam pengaturan eksisting adalah 1,2 detik, sedangkan hasil perhitungan menunjukkan 1,6 detik. Perbedaan waktu ini kemungkinan disebabkan oleh pertimbangan jarak gangguan yang lebih jauh dari gardu induk, sehingga memerlukan waktu tunda yang lebih panjang untuk memastikan bahwa gangguan berada dalam jangkauan proteksi yang tepat. Pengaturan perhitungan memberikan waktu yang lebih lama agar proteksi bekerja lebih efektif, terutama pada kondisi gangguan yang lebih kompleks dan memerlukan verifikasi tambahan untuk menghindari pemutusan yang tidak perlu. Oleh karena itu, penyesuaian terhadap pengaturan eksisting pada Zona 3 perlu dipertimbangkan untuk memberikan proteksi yang lebih komprehensif dan efektif terhadap gangguan di area yang lebih jauh, serta memastikan bahwa sistem proteksi dapat beroperasi dengan lebih andal dalam berbagai skenario gangguan.

IV. KESIMPULAN

- Untuk Zona 1 dan Zona 2, perbandingan antara nilai eksisting dan perhitungan menunjukkan hasil yang sangat mendekati, baik dari segi impedansi maupun waktu operasi. Hal ini mengindikasikan bahwa pengaturan proteksi eksisting sudah akurat dalam mencakup area proteksi yang dimaksud dan memberikan waktu operasi yang sesuai.
- Untuk Zona 3, terdapat perbedaan antara nilai impedansi dan waktu operasi eksisting dengan hasil perhitungan. Nilai perhitungan menunjukkan bahwa Zona 3 membutuhkan pengaturan yang sedikit lebih besar dari eksisting, serta waktu tunda yang lebih panjang (1,6 detik dibanding 1,2 detik). Hal ini menunjukkan bahwa proteksi eksisting perlu dilakukan penyesuaian, khususnya dalam menghadapi gangguan yang lebih jauh dari gardu induk.

- Secara keseluruhan, pengaturan eksisting telah mendekati hasil perhitungan pada Zona 1 dan Zona 2, namun pada Zona 3 diperlukan peninjauan lebih lanjut untuk memastikan proteksi optimal terhadap gangguan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Azis, A., & Pebrianti, I. K. (2019). ANALISIS PENYALURAN DAYA LISTRIK PADA SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI 150 KV DARI PLTU BUKIT ASAM KE GARDU INDUK KERAMASAN PALEMBANG. *Jurnal Surya Energy*, 3(2), 282-290.
- [2] Nurdin, A., & Azis, A. (2018). Pengaruh Jarak Antar Sub Konduktor Berkas Reaktansi Induktif Saluran Terhadap Transmisi 150 Kv Dari Gardu Induk Keramasan Ke Gardu Induk Mariana. *Jurnal Ampere*, 3(2), 145-156.
- [3] Azis, A., & Nurdin, A. (2019). Pengaruh Andongan terhadap Kapasitansi ke Tanah pada Saluran Transmisi 150 Kv dari Gardu Induk Keramasan ke Gardu Induk Mariana. *Jurnal Ampere*, 4(1), 274-288.
- [4] Azis, A., & Febrianti, I. K. (2019). Analisis Sistem Proteksi Arus Lebih Pada Penyulang Cendana Gardu Induk Bungaran Palembang. *Jurnal Ampere*, 4(2), 332-344.
- [5] Hidayatullah, K., Hartati, R. S., & Sukerayasa, I. W. (2019). Analisis Penentuan Setting Distance Relay Penghantar Sutt 150 Kv Gis Pesanggaran–Gi Pemecutan Kelod. *Jurnal SPEKTRUM Vol*, 6(1).
- [6] Adrian, A. T., & Umar, S. T. (2022). *Analisa Proteksi Rele Jarak Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi 150kv Gardu Induk Solo Baru–Palur* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- [7] Romdhani, D., & Muljono, A. B. (2021). PROTEKSI RELE JARAK PADA JARINGAN SUTT 150 KV GI AMPENAN “PLTU LOMBOK ENERGY DYNAMIC (LED). *DIELEKTRIKA*, 8(1), 36-43.
- [8] RIZAL, C. (2020). SETTING RELE JARAK PADA PENGHANTAR TALANG KELAPA 1 DI GI GANDUS UPT PALEMBANG UIP3B SUMATERA. *Teknik Elektro*.
- [9] Sampeallo, A. S., Nursalim, N., & Sagho, M. A. S. (2020). Evaluasi Penyetelan Rele Jarak Pada Jaringan Transmisi 70 Kv Bolok–Maulafa Menggunakan Digsilent 15.1. 7. *Jurnal Media Elektro*, 1-9.
- [10] Sugianto, S., & Yusuf, E. M. (2020). ANALISIS PROTEKSI RELE JARAK PADA SALURAN UDARA TEGANGAN TINGGI 150 KV. *SINUSOIDA*, 22(4), 1-12.
- [11] PLN, P. (2013). Pedoman dan Petunjuk Sistem Proteksi Transmisi dan Gardu Induk Jawa Bali. *Jakarta: PT. PLN*.