
Analisa Setting Relai Arus Lebih (OCR) Dan Relai Gangguan Tanah (GFR) Pada Penyulang Gurami Gardu Induk Sungai Kedukan Palembang

Choirul Rizal¹, Abdul Azis²

1 Program Studi Teknik Elektro, Universitas Palembang, Indonesia
2 Program Studi Teknik Elektro, Universitas PGRI Palembang, Indonesia.

*e-mail: choirulrizal1962@gmail.com, azis@univpgri-palembang.ac.id

ABSTRAK

Relai Arus Lebih merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat yang dapat merusak peralatan sistem tenaga listrik yang berada dalam wilayah proteksinya. Relai arus lebih ini digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, dan dapat juga digunakan sebagai pengaman utama ataupun pengaman cadangan. Dari hasil penelitian diperoleh hasil bahwa besarnya arus gangguan hubung singkat dipengaruhi oleh jarak titik gangguan, semakin jauh lokasi gangguan maka arus gangguan hubung singkat akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya. Waktu kerja relai di sisi penyulang lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja di incoming dengan selisih waktu rata-rata sebesar 1,34 detik. Hal ini disebabkan lokasi gangguan mempengaruhi besar kecilnya selisih waktu. Semakin jauh jarak lokasi gangguan, maka semakin besar selisih waktu kerja relai di incoming.

Kata Kunci: *Setting, Relai, Penyulang*

Analysis of Over Current Relay (OCR) and Ground Fault Relay (GFR) Settings at Gurami Feeder Sungai Kedukan Palembang Substation

ABSTRACT

Over Current Relays are equipment that signals an overcurrent, whether caused by a short circuit that can damage electrical power system equipment within its protection area. This overcurrent relay is used in almost all electrical power system security patterns, and can also be used as the main safety or backup safety. From the results of the study, it was found that the magnitude of the short-circuit fault current is influenced by the distance of the fault point, the farther the fault location is, the smaller the short-circuit fault current will be, and vice versa. The relay working time on the feeder side is faster than the incoming working time with an average time difference of 1.34 seconds. This is because the location of the disturbance affects the size of the time difference. The farther the distance from the fault location, the greater the difference in relay working time in incoming

Keywords: *Setting, Relay, Feeder*

Correspondence author : Choirul Rizal, Universitas Palembang, Indonesia.
E-Mail: choirulrizal1962@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Energi listrik yang dibangkitkan di pusat pembangkitan. Setelah dibangkitkan maka selanjutnya energi listrik disalurkan ke konsumen melalui sistem tenaga listrik. Kenyataannya sistem distribusi adalah sistem yang sering mengalami gangguan [7]. Dalam pelaksanaan penyaluran daya listrik akan terjadi kondisi tidak normal (gangguan) yang menyebabkan terganggunya kelangsungan pelayanan energi listrik terhadap konsumen. Gangguan yang dimaksud antara lain gangguan hubung singkat. Gangguan-gangguan tersebut jika tidak dengan segera diperbaiki maka dapat merusak peralatan dan sistem tenaga listrik. Maka diperlukan sistem pengaman (sistem proteksi), yang harus dapat mendeteksi terjadinya gangguan serta membatasi pengaruh-pengaruh lainnya [1,2,3,4,7].

Sistem proteksi adalah suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik, yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, dan penyebab yang lainnya. Sistem proteksi merupakan pengaman listrik pada sistem tenaga listrik yang terpasang pada sistem distribusi tenaga listrik, transformator tenaga, transmisi tenaga listrik dan generator listrik yang dipergunakan untuk mengamankan sistem tenaga listrik dari gangguan listrik atau beban lebih, dengan cara memisahkan bagian sistem tenaga listrik yang terganggu. Sehingga sistem kelistrikan yang tidak terganggu dapat terus bekerja (mengalirkan arus ke beban atau konsumen). Jadi pada hakekatnya pengaman pada sistem tenaga listrik yaitu mengamankan seluruh sistem tenaga listrik supaya kehandalan tetap terjaga [5,8].

Salah satu peralatan yang berfungsi untuk memproteksi peralatan listrik terhadap arus lebih yang disebabkan oleh gangguan hubung singkat adalah Relai Arus Lebih atau yang lebih dikenal dengan *Over Current Relay* (OCR) [5]. Relai Arus Lebih digunakan sebagai proteksi cadangan lokal pada proteksi penghantar, dan digunakan untuk mengamankan penghantar dari gangguan fasa-fasa. Untuk mengetahui setting Relai Arus Lebih (OCR) dan Relai Gangguan Tanah (GFR), maka akan dilakukan pada Penyulang Gurami Gardu Induk Sungai Kedukan Palembang

Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi karena adanya kesalahan antara bagian-bagian yang bertegangan. Gangguan hubung singkat dapat juga terjadi akibat adanya isolasi yang tembus atau rusak karena tidak tahan terhadap tegangan lebih, baik yang berasal dari dalam maupun yang berasal dari luar (akibat sambaran petir). Gangguan hubung singkat dapat terjadi tiga fasa, dua fasa, satu fasa ke tanah. Gangguan hubung singkat ini sendiri dapat digolongkan menjadi dua kelompok yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetri yaitu gangguan hubung singkat tiga fasa, sedangkan gangguan yang lainnya merupakan gangguan hubung singkat tak simetri (asimetri). Gangguan ini akan mengakibatkan arus lebih pada fasa yang terganggu dan juga akan dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu [1,3,5,8].

1. Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa
Gangguan hubung singkat tiga fasa termasuk dalam klasifikasi gangguan simetris, dimana arus maupun tegangan stiap fasanya tetap seimbang setelah gangguan terjadi. Sehingga pada sistem seperti ini dapat dianalisa hanya dengan menggunakan urutan positif saja.
2. Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa
Gangguan hubung singkat dua fasa atau yang biasa disebut hubung singkat fasa ke fasa adalah kondisi dimana antara fasa ke fasa saling terhubung singkat. Pada gangguan hubung singkat fasa ke fasa, arus saluran tidak mengandung komponen urutan nol dikarenakan tidak ada gangguan yang terhubung ke tanah.

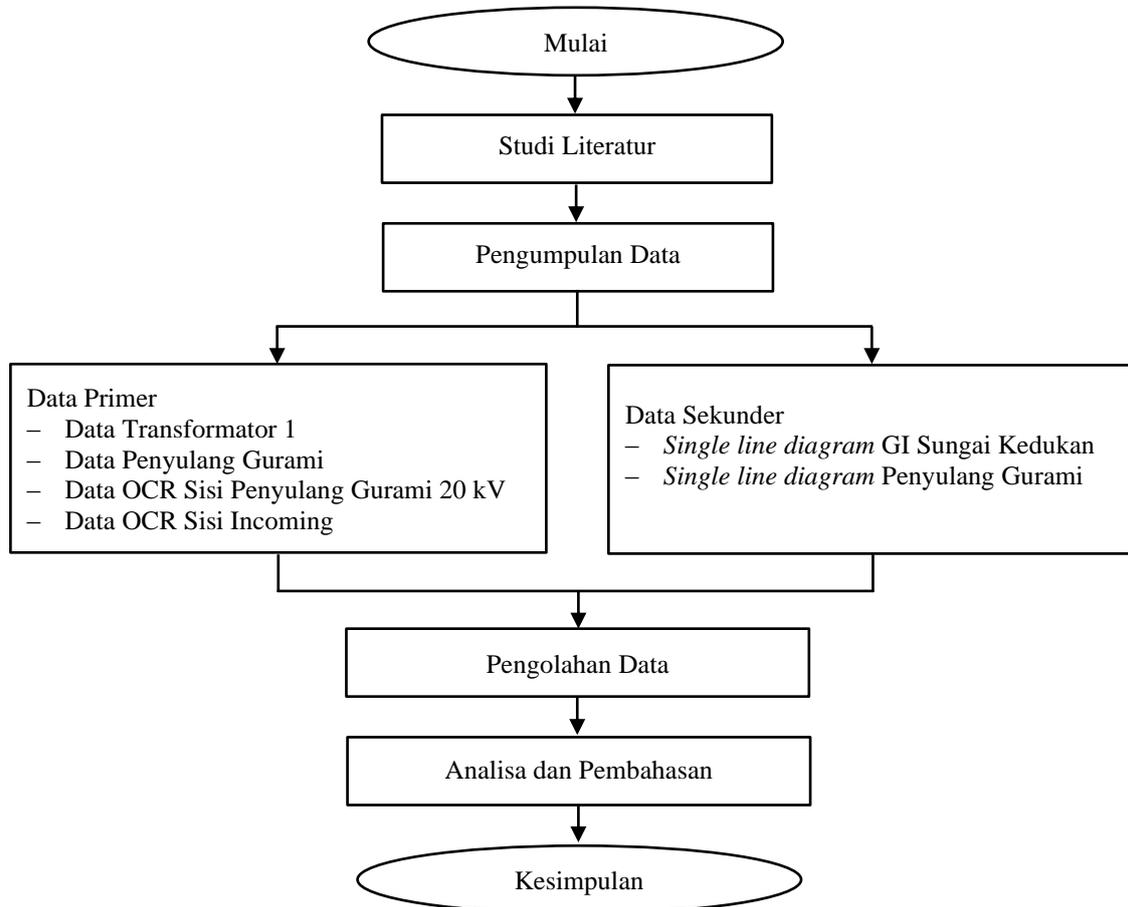
3. Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa Ke Tanah

Gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik merupakan gangguan asimetris sehingga memerlukan metode komponen simetris untuk menganalisa tegangan dan arus pada saat terjadi gangguan.

Relai Arus Lebih

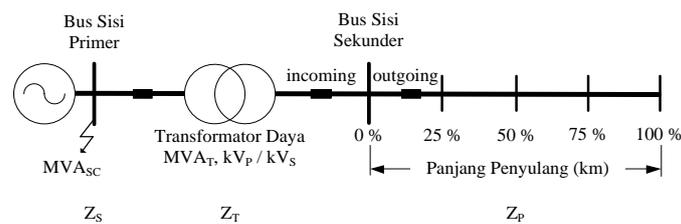
Relai Arus Lebih atau yang lebih dikenal dengan *Over Current Relay* (OCR) merupakan peralatan yang mensinyalir adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat atau *overload* yang dapat merusak peralatan sistem tenaga yang berada dalam wilayah proteksinya. Relai Arus Lebih ini digunakan hampir pada seluruh pola pengamanan sistem tenaga listrik, dan relai ini dapat digunakan sebagai pengaman utama ataupun pengaman cadangan [1].

II. METODE PENELITIAN



Gambar 1. Bagan Alir Penelitian

Berdasarkan diagram alir metode penelitian pada gambar 1, maka langkah–langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini adalah: melakukan studi literatur, pengumpulan data primer dan sekunder, kemudian data yang sudah didapatkan diolah agar dapat dipergunakan dalam penelitian, selanjutnya, menganalisa hasil penelitian. Sebelum menentukan arus hubung singkat, maka harus ditentukan terlebih dahulu rel daya tegangan primer di gardu induk untuk berbagai jenis gangguan, kemudian menentukan pada titik–titik lainnya yang letaknya semakin jauh dari gardu induk tersebut. Untuk menentukan arus gangguan hubung singkat, pertama–tama harus ditentukan terlebih dahulu besar impedansi sumber, kedua menentukan impedansi transformator tenaga, ketiga menentukan impedansi impedansi penyulang [1].



Gambar 2. Representasi Penyulang

Impedansi Sumber

Untuk menentukan impedansi sumber di bus sisi sekunder, maka harus ditentukan terlebih dahulu impedansi sumber di bus sisi primer. Impedansi sumber di bus sisi primer (Z_S sisi primer) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [2]:

$$Z_S \text{ (sisi primer)} = j X_S \text{ (sisi primer)} = j \frac{kV_P^2 \text{ (sisi primer)}}{MVA_{SC}} (\Omega) \quad (1)$$

Dimana daya hubung singkat di bus sisi primer (MVA_{SC}), adalah:

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \times kV_P \text{ (sisi primer)} \times I_{SC} \text{ (sisi sekunder)}$$

dan, arus hubung singkat sisi sekunder (I_{SC} sisi sekunder), adalah:

$$I_{SC} \text{ (sisi sekunder)} = \frac{MVA_T}{\sqrt{3} \times kV_S \text{ (sisi sekunder)} \times Z_T}$$

Arus gangguan hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat di sisi sekunder, maka impedansi tersebut harus dikonversikan dulu ke sisi sekunder. Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi primer ke sisi sekunder, dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [2]:

$$Z_S \text{ (sisi sekunder)} = j X_S \text{ (sisi sekunder)} = \frac{kV_S^2 \text{ (sisi sekunder)}}{kV_P^2 \text{ (sisi primer)}} \times j X_S \text{ (sisi primer)} (\Omega) \quad (2)$$

Impedansi Transformator

Impedansi suatu transformator yang diambil adalah harga reaktansinya, sedangkan tahananannya diabaikan karena harganya kecil. Maka impedansi transformator adalah [6]:

1. Nilai impedansi transformator pada 100 % atau $Z_T (100\%) = j X_T (100\%)$ untuk transformator pada sisi sekunder, adalah:

$$Z_T (100\%) = j X_T (100\%) = j \frac{kV^2 \text{ (sisi sekunder)}}{MVA_T} (\Omega) \quad (3)$$

2. Nilai impedansi transformator urutan positif ($Z_{1T} = j X_{1T}$) sama dengan nilai impedansi transformator urutan negatif ($Z_{2T} = j X_{2T}$), yaitu:

$$Z_{1T} = Z_{2T} = j X_{1T} = j X_{2T} = Z_T (\%) \times j X_T (100 \%) (\Omega) \quad (4)$$

3. Untuk transformator dengan hubungan belitan YY dan tidak mempunyai belitan delta (Δ) di dalamnya, maka untuk menghitung besarnya impedansi transformator urutan nol $Z_{0T} = j X_{0T}$ berkisar antara 9 s/d $14 \times j X_{1T}$. Dalam penelitian ini diambil nilai sebesar:

$$Z_{0T} = j X_{0T} = 10 \times j X_{1T} (\Omega) \quad (5)$$

Impedansi Penyulang

Nilai impedansi penyulang tergantung dari besarnya impedansi/km ($Z_P = R_P + jX_P$) dan panjang penyulang (l_P). Maka nilai impedansi penyulang adalah sebagai berikut [1]:

1. Impedansi penyulang urutan positif (Z_{1P}) = impedansi penyulang urutan negatif (Z_{2P})

$$Z_{1P} = Z_{2P} = Z_{1P} \times l_P = (R_{1P} + j X_{1P}) \times l_P (\Omega) \quad (6)$$

2. Impedansi penyulang urutan nol (Z_{0P})

$$Z_{0P} = Z_{0P} \times l_P = (R_{0P} + j X_{0P}) \times l_P (\Omega) \quad (7)$$

Impedansi Ekuivalen Jaringan

Perhitungan yang akan dilakukan di sini adalah perhitungan besarnya nilai impedansi ekuivalen positif, negatif dan nol dari titik gangguan sampai ke sumber. Karena dari sejak sumber ke titik gangguan impedansi yang terbentuk adalah tersambung seri maka perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} dapat langsung dengan cara menjumlahkan impedansi tersebut, sedangkan untuk perhitungan Z_{0eq} dimulai dari titik gangguan sampai ke transformator tenaga yang netralnya ditanahkan. Impedansi ekuivalen jaringan dapat ditentukan hitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [1]:

1. Impedansi ekuivalen urutan positif dan urutan negatif ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$)

$$\begin{aligned} Z_{1eq} = Z_{2eq} &= Z_{1S} \text{ (sisi sekunder)} + Z_{1T} + Z_{1P} \\ Z_{1eq} = Z_{2eq} &= j X_{1S} \text{ (sisi sekunder)} + j X_{1T} + (R_{1P} + j X_{1P}) \end{aligned} \quad (8)$$

2. Impedansi ekuivalen urutan nol (Z_{0eq})

$$Z_{0eq} = Z_{0T} + 3R_n + Z_{0P} = j X_{0T} + 3R_n + (R_{0P} + jX_{0P}) \quad (9)$$

Arus Gangguan Hubung Singkat

Perhitungan arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan menggunakan rumus dasar, impedansi ekuivalen mana yang dimasukkan ke dalam rumus dasar tersebut adalah jenis gangguan hubung singkat tiga fasa, dua fasa, atau satu fasa ke tanah. Sehingga formula yang digunakan untuk perhitungan arus hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa ke tanah berbeda [8].

1. Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Arus gangguan hubung singkat 3 fasa ($I_{hs \text{ 3 fasa}}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{hs \text{ 3 fasa}} = \frac{V_{L-N}}{Z_{1eq}} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3} Z_{1eq}} \quad (10)$$

2. Arus Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Arus gangguan hubung singkat 2 fasa ($I_{hs \text{ 2 fasa}}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{hs \text{ 2 fasa}} = \frac{V_{L-L}}{Z_{1eq} + Z_{2eq}} = \frac{V_{L-L}}{2 \times Z_{1eq}} \quad (11)$$

3. Arus Gangguan Hubung Singkat 1 Fasa ke Tanah

Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah (I_{hs} 1 fasa ke tanah) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{hs \text{ 1 fasa ke tanah}} = \frac{3 \times V_{L-N}}{Z_{1 \text{ eq}} + Z_{2 \text{ eq}} + Z_{0 \text{ eq}}} = \frac{3 \times \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_{1 \text{ eq}} + Z_{0 \text{ eq}}} \quad (12)$$

Setting Relai Arus Lebih di Sisi Penyulang 20 kV (Outgoing)

1. Setting Arus

Setting relai yang terpasang di penyulang dihitung berdasarkan arus beban maksimum. Relai *inverse* biasa diset sebesar 1,05 sampai dengan $1,1 \times I_{maks}$, sedangkan untuk relai *definite* diset sebesar 1,2 sampai dengan $1,3 \times I_{maks}$. Persyaratan lain yang harus dipenuhi yaitu untuk penyetelan waktu minimum dari relai arus lebih (terutama di penyulang tidak lebih kecil dari 0,3 detik). Keputusan ini diambil agar relai tidak sampai trip lagi akibat adanya arus *inrush* dari transformator yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukkan. Setting arus pada sisi primer transformator adalah [5]:

$$I_{set} \text{ (primer)} = 1,1 \times I_{beban} \quad (13)$$

Nilai arus tersebut merupakan nilai *setting* pada sisi primer, sedangkan nilai yang akan disetkan pada relai adalah nilai sekundernya. Olehnya dihitung menggunakan nilai rasio transformator arus yang terpasang pada penyulang. Besar arus pada sisi sekunder adalah [5]:

$$I_{set} \text{ (sekunder)} = I_{set} \text{ (primer)} \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} \quad (14)$$

2. Setting Waktu

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya *setting* TMS OCR sisi penyulang 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat tiga fasa di 0% panjang penyulang. Waktu kerja paling hilir yang ditetapkan $t = 0,3$ sekon Keputusan ini diambil agar relai tidak sampai trip lagi akibat adanya arus *inrush* dari transformator–transformator distribusi yang sudah tersambung di jaringan distribusi, pada saat PMT penyulang tersebut dimasukan. Maka *setting* waktu (TMS) adalah sebagai berikut [5]:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{3 \text{ fasa}}(0\%)}{I_{set} \text{ (primer)}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} \quad (15)$$

Setting Relai Arus Lebih di Sisi Incoming 20 kV

1. Setting Arus

Berbeda dengan sisi penyulang, pada sisi *incoming* 20 kV diperlukan nilai arus nominal dalam menentukan *setting* relainya. Maka arus nominal transformator pada sisi 20 kV adalah [6]:

$$I_{nominal} \text{ (sekunder)} = \frac{kVA_T}{\sqrt{3} V_{L-L}} \quad (16)$$

Setting arus untuk Relai Arus Lebih, pada sisi primer adalah:

$$I_{set} \text{ (primer)} = 1,1 \times I_{nominal} \text{ (sekunder)} \quad (17)$$

Maka *setting* arus untuk Relai Arus Lebih, pada sisi sekunder adalah:

$$I_{set} \text{ (sekunder)} = I_{set} \text{ (primer)} \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} \quad (18)$$

2. Setting Waktu Kerja atau *Time Multiplier Setting* (TMS)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya *setting* TMS relai arus lebih atau OCR sisi *incoming* 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat 3 fasa di 0 % panjang penyulang. Waktu kerja *incoming* didapat dengan waktu kerja relai disisi hilir +

0,4 detik. Maka $t_{incoming} = (0,3 + 0,7) = 0,7$ detik. Setelah diketahui nilai ketetapan $t = 0,7$ detik, maka nilai TMS dapat diketahui yaitu [6]:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_3 \text{ fasa } (0\%)}{I_{set} \text{ (primer)}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} \quad (19)$$

Setting Relai Gangguan Tanah di Sisi Penyulang 20 kV (*Outgoing*)

1. *Setting* Arus

Untuk *setting* arus di penyulang menggunakan pedoman yaitu *setting* arus gangguan ke tanah di penyulang diset 10 % x arus gangguan 1 fasa ke tanah terkecil di penyulang tersebut. Hal ini dilakukan untuk menampung tahanan busur. Dimana arus gangguan terkecil terletak di lokasi gangguan 100% maka *setting* arus untuk Relai Gangguan Tanah sisi primer adalah [6]:

$$I_{set} \text{ (primer)} = 10\% \times I_1 \text{ fasa ke tanah (100\%)} \quad (20)$$

Maka *setting* arus untuk Relai Gangguan Tanah, pada sisi sekunder adalah:

$$I_{set} \text{ (sekunder)} = I_{set} \text{ (primer)} \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} \quad (21)$$

2. *Setting* Waktu Kerja atau *Time Multiplier Setting* (TMS)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya *setting* TMS Relai Gangguan Tanah atau *Ground Fault Relay* (GFR) sisi penyulang 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat 1 fasa di 0 % panjang penyulang. Waktu kerja paling hilir yang ditetapkan $t = 0,3$ sekon, maka nilai TMS dapat diketahui yaitu [6]:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_1 \text{ fasa ke tanah } (0\%)}{I_{set} \text{ (primer)}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} \quad (22)$$

Menentukan *Setting* Relai Gangguan Tanah Di Sisi *Incoming* 20 kV

1. *Setting* Arus

Agar Relai Gangguan Tanah sisi *incoming* lebih peka atau cepat merasakan gangguan sesuai dengan sifatnya sebagai *backup* setelah relai sisi penyulang maka dalam menentukan *setting*nya dibuat lebih kecil yaitu 8% x arus gangguan 1 fasa ke tanah terkecil yaitu pada lokasi 100%. Maka *setting* arus untuk Relai Gangguan Tanah, pada sisi primer adalah [6]:

$$I_{set} \text{ (primer)} = 8\% \times I_1 \text{ fasa ke tanah (100\%)} \quad (23)$$

Maka *setting* arus untuk relai gangguan tanah, pada sisi sekunder adalah:

$$I_{set} \text{ (sekunder)} = I_{set} \text{ (primer)} \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} \quad (24)$$

2. *Setting* Waktu Kerja atau *Time Multiplier Setting* (TMS)

Arus gangguan yang dipilih untuk menentukan besarnya *setting* TMS Relai Gangguan Tanah atau GFR sisi *incoming* 20 kV transformator tenaga yaitu arus gangguan hubung singkat 3 fasa di 0 % panjang penyulang. Waktu kerja *incoming* didapat dengan waktu kerja relai disisi hilir + 0,4 detik. Maka $t_{incoming} = (0,3 + 0,7) = 0,7$ detik. Setelah diketahui nilai ketetapan $t = 0,7$ detik, maka nilai TMS dapat diketahui yaitu [6]:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_1 \text{ fasa ke tanah } (0\%)}{I_{set} \text{ (primer)}} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} \quad (25)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gardu Induk Sungai Kedukan Palembang mempunyai fungsi menyalurkan energi listrik ke konsumen melalui jaringan tegangan menengah. Untuk menyalurkan energi listrik tersebut, pada Gardu Induk Sungai Kedukan Palembang terdapat Transformator 1, 30 MVA 70/20 kV dengan beban empat buah penyulang, yaitu: Penyulang Belido, Penyulang Gurami, Penyulang Lele, dan Penyulang Baung. Pada penelitian hanya membahas mengenai setting Relai Arus Lebih (OCR) pada Penyulang Gurami

Data Penelitian

Data Transformator 1

- Merk	: Pauwels
- Standard	: IEC 60076
- Rated Power MVA (MVA_T)	: 30 MVA
- Cooling	: ONAN/ONAF
- Phases – Frequency	: 3 – 50 Hz
- Tegangan Primer (kV_P 70 kV)	: 70 kV
- Tegangan Sekunder (kV_S 20 kV)	: 20 kV
- Arus Primer ($I_{nominal}$ primer)	: 247,4358 A
- Arus Sekunder ($I_{nominal}$ sekunder)	: 866,0254 A
- Phasa	: 3 Phasa
- Impedance ($Z_T\%$)	: 12,24%
- Vector Group	: YNyn0
- Tahanan Pentanahan (R_n)	: 40 Ω

Data Penyulang Gurami

- Jenis Pengantar	: AAAC 150 mm ²
- Panjang (l_p)	: 16,5 km
- Impedansi Urutan Positif (Z_{1P})	: 0,2162 + j 0,3305 Ω/km
- Impedansi Urutan Negatif (Z_{2P})	: 0,2162 + j 0,3305 Ω/km
- Impedansi Urutan Nol (Z_{0P})	: 0,3631 + j 1,6180 Ω/km

Data Relai Arus Lebih di Sisi Penyulang Gurami 20 kV (*Outgoing*)

- Merk	: Schneider
- Type	: Micom P642
- Karakteristik	: Standar Inverse
- $I_{setting}$ OCR	: 300 A
- Ratio CT	: 300/5
- TMS OCR	: 0,125

Data Relai Arus Lebih di Sisi *Incoming*

- Merk	: Schneider
- Type	: Micom P142
- Karakteristik	: Standar Inverse
- $I_{setting}$ OCR	: 960 A
- Ratio CT	: 1.000/5
- TMS OCR	: 0,1

Impedansi Sumber

Arus hubung singkat sisi sekunder (I_{SC} 20 kV), yaitu:

$$I_{SC} (20 \text{ kV}) = \frac{MVA_T}{\sqrt{3} \times kV_S (20 \text{ kV}) \times Z_T} = \frac{30}{\sqrt{3} \times 20 \times \frac{12,24}{100}} = 7,0754 \text{ kA}$$

Maka daya hubung singkat di bus sisi primer (MVA_{SC}), yaitu:

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \times kV_P (70 \text{ kV}) \times I_{SC} (20 \text{ kV}) = \sqrt{3} \times 70 \times 7,0754 = 857,8431 \text{ MVA}$$

Impedansi sumber di sisi primer Z_S (70 kV) dapat ditentukan dengan persamaan (1):

$$Z_S (70 \text{ kV}) = j X_S (70 \text{ kV}) = j \frac{kV^2 (70 \text{ kV})}{MVA_{SC}} = j \frac{70^2}{857,8431} = j 5,7120 \Omega$$

Maka impedansi sumber di sisi sekunder Z_S (20 kV) dapat ditentukan dengan persamaan (2):

$$Z_S (20 \text{ kV}) = j X_S (20 \text{ kV}) = \frac{kV^2 (20 \text{ kV})}{kV^2 (70 \text{ kV})} \times j X_S (70 \text{ kV}) = \frac{20^2}{70^2} \times j 18,1180 = j 0,4663 \Omega$$

Impedansi Transformator

Impedansi transformator pada 100 % atau Z_T (100 %) = $j X_T$ (100 %) untuk transformator pada sisi sekunder, dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3) sebagai berikut:

$$Z_T (100 \%) = j X_T (100 \%) = j \frac{kV^2 (20 \text{ kV})}{MVA_T} = j \frac{20^2}{30} = j 13,3333 \Omega$$

Maka nilai impedansi transformator urutan positif dan nilai impedansi transformator urutan negatif ($Z_{1T} = Z_{2T}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (4):

$$Z_{1T} = Z_{2T} = j X_{1T} = j X_{2T} = Z_T (\%) \times j X_T (100 \%) = 0,124 \times j 13,3333 = j 1,6320 \Omega$$

$$Z_{0T} = j X_{0T} = 10 \times j X_{1T} = 10 \times j 1,6320 = j 16,3200 \Omega$$

Impedansi Penyulang

Penyulang Gurami menggunakan jenis penghantar AAAC 150 mm² dengan panjang penyulang 16,5 km. Maka nilai impedansi penyulang urutan positif (Z_{1P}) dan impedansi penyulang urutan negatif (Z_{2P}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (6), yaitu:

$$Z_{1P} = Z_{2P} = (R_{1P} + j X_{1P}) \times l_p = (0,2162 + j 0,3305) \times 16,5 = 3,5673 + j 5,4533 \Omega$$

Kemudian nilai impedansi penyulang urutan nol (Z_{0P}) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (7) sebagai berikut:

$$Z_{0P} = (R_{0P} + j X_{0P}) \times l_p = (0,3631 + j 1,6180) \times 16,5 = 5,9912 + j 26,69707 \Omega$$

Dengan demikian nilai impedansi penyulang urutan positif dan urutan negatif ($Z_{1P} = Z_{2P}$) serta impedansi penyulang urutan nol (Z_{0P}) untuk lokasi gangguan dengan jarak 0 %, 25 %, 50 %, 75 % dan 100 % dari panjang penyulang, adalah:

Tabel 1. Impedansi Penyulang Berdasarkan Lokasi Gangguan

Panjang Penyulang		$Z_{1P} = Z_{2P} (\Omega)$	$Z_{0P} (\Omega)$
(%)	(km)		
0%	0,0000	$0,0000 + j 0,0000 = 0,0000 + j 0,0000^\circ$	$0,0000 + j 0,0000 = 0,0000 + j 0,0000^\circ$
25%	4,1250	$0,8918 + j 1,3633 = 1,6291 + j 56,8089^\circ$	$1,4978 + j 6,6743 = 6,8402 + j 77,3516^\circ$
50%	8,2500	$1,7837 + j 2,7266 = 3,2582 + j 56,8089^\circ$	$2,9956 + j 13,3485 = 13,6805 + j 77,3516^\circ$
75%	12,3750	$2,6755 + j 4,0899 = 4,8873 + j 56,8089^\circ$	$4,4934 + j 20,0228 = 20,5207 + j 77,3516^\circ$
100%	16,5000	$3,5673 + j 5,4533 = 6,5164 + j 56,8089^\circ$	$5,9912 + j 26,6970 = 27,3610 + j 77,3516^\circ$

Impedansi Ekuivalen Jaringan

Impedansi ekuivalen jaringan urutan positif dan urutan negatif ($Z_{1\text{ eq}} = Z_{2\text{ eq}}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (8) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_{1\text{ eq}} = Z_{2\text{ eq}} &= j X_{1S} (20\text{ kV}) + j X_{1T} + (R_{1P} + j X_{1P}) \\ &= j 0,4663 + j 1,6320 + (3,5673 + j 5,4533) = 3,5673 + j 7,5515 \Omega \end{aligned}$$

Kemudian impedansi ekuivalen jaringan urutan nol ($Z_{0\text{ eq}}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (9) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} Z_{0\text{ eq}} &= j X_{0T} + 3R_n + (R_{0P} + j X_{0P}) \\ &= j 16,3200 + 3 \times 40 + (5,9912 + j 26,6970) = 125,9912 + j 75,6570 \Omega \end{aligned}$$

Dengan demikian nilai impedansi ekuivalen penyulang urutan positif dan urutan negatif ($Z_{1\text{ eq}} = Z_{2\text{ eq}}$) serta impedansi ekuivalen penyulang urutan nol ($Z_{0\text{ eq}}$) untuk lokasi gangguan dengan jarak 0 %, 25 %, 50 %, 75 % dan 100 % dari panjang penyulang, adalah:

Tabel 2. Impedansi Ekuivalen Berdasarkan Lokasi Gangguan

Panjang Penyulang		$Z_{1P} = Z_{2P} (\Omega)$	$Z_{0P} (\Omega)$
(%)	(km)		
0%	0,0000	$0,0000 + j 2,0983 = 2,0983 \angle 0,0000^\circ$	$120,0000 + j 48,9600 = 129,6036 \angle 22,1955^\circ$
25%	4,1250	$0,8918 + j 3,4616 = 3,5746 \angle 75,5528^\circ$	$121,4978 + j 55,6343 = 133,6296 \angle 24,6032^\circ$
50%	8,2500	$1,7837 + j 4,8249 = 5,1440 \angle 69,7119^\circ$	$122,9956 + j 62,3085 = 137,8777 \angle 26,8664^\circ$
75%	12,3750	$2,6755 + j 6,1882 = 6,7418 \angle 66,6188^\circ$	$124,4934 + j 68,9828 = 142,3279 \angle 28,9912^\circ$
100%	16,5000	$3,5673 + j 7,5515 = 8,3517 \angle 64,7142^\circ$	$125,9912 + j 75,6570 = 146,9617 \angle 30,9846^\circ$

Arus Gangguan Hubung Singkat

1. Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa

Arus gangguan hubung singkat 3 fasa ($I_{3\text{ fasa}}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (10) sebagai berikut:

$$I_{\text{hs } 3\text{ fasa}} = \frac{V_{L-L}}{Z_{1\text{ eq}}} = \frac{20.000}{8,3517 \angle 64,7142^\circ} = \frac{11.547,0054}{8,3517 \angle 64,7142^\circ} = 1.382,5892 \angle -64,7142^\circ \text{ A}$$

2. Arus Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa

Arus gangguan hubung singkat 2 fasa ($I_{2\text{ fasa}}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (11) sebagai berikut:

$$I_{\text{hs } 2\text{ fasa}} = \frac{V_{L-L}}{2 \times Z_{1\text{ eq}}} = \frac{20.000}{2 \times (8,3517 \angle 64,7142^\circ)} = \frac{20.000}{16,7035 \angle 64,7142^\circ} = 1.952,3573 \angle -64,7142^\circ \text{ A}$$

3. Arus Gangguan Hubung Singkat 1 fasa ke tanah

Arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah ($I_{1\text{ fasa ke tanah}}$) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (12) sebagai berikut:

$$\begin{aligned} I_{\text{hs } 1\text{ fasa ke tanah}} &= \frac{3 \times \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}}}{2 \times Z_{1\text{ eq}} + Z_{0\text{ eq}}} = \frac{3 \times \frac{20.000}{\sqrt{3}}}{2 \times (3,5673 + j 7,5515) + 125,9912 + j 75,6570} \\ &= \frac{34.641,0162}{133,1258 + j 58,1201} = 238,4763 \angle -23,5851^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Dengan demikian nilai arus gangguan hubung singkat 3 fasa ($I_{hs\ 3\ fasa}$), 2 fasa ($I_{hs\ 2\ fasa}$), 1 fasa ke tanah ($I_{hs\ 1\ fasa\ ke\ tanah}$) untuk lokasi gangguan dengan jarak 0 %, 25 %, 50 %, 75 % dan 100 % dari panjang penyulang, adalah:

Tabel 3. Hasil Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan		$I_{hs\ 3\ fasa}\ (A)$	$I_{hs\ 2\ fasa}\ (A)$	$I_{hs\ 1\ fasa\ ke\ tanah}\ (A)$
(%)	(km)			
0%	0,0000	5.503,0663 \angle 0,0000°	4.765,7952 \angle 0,0000°	284,5463 \angle -9,7021°
25%	4,1250	3.230,2616 \angle -75,5528°	2.797,4886 \angle -75,5528°	273,0657 \angle -13,6406°
50%	8,2500	2.244,7338 \angle -69,7119°	1.943,9965 \angle -69,7119°	261,3833 \angle -17,2581°
75%	12,3750	1.712,7405 \angle -66,6188°	1.483,2768 \angle -66,6188°	249,7847 \angle -20,5667°
100%	16,5000	1.382,5892 \angle -64,7142°	1.197,3573 \angle -64,7142°	238,4763 \angle -23,5851°

Setting Relai Arus Lebih Di Sisi Penyulang 20 kV (*Outgoing*)

1. Setting Arus

$$I_{beban} = 94\ A$$

$$\text{Rasio CT} = 300/5\ A$$

Setting arus untuk Relai Arus Lebih, pada sisi primer dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (13) sebagai berikut:

$$I_{set}\ (70\ kV) = 1,1 \times I_{beban} = 1,1 \times 94 = 103,400\ A$$

Maka besarnya arus pada sisi sekunder dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (14) sebagai berikut:

$$I_{set}\ (20\ kV) = I_{set}\ (70\ kV) \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} = 103,400 \times \frac{1}{300/5} = 1,7233\ A$$

2. Setting Waktu

Setting waktu (TMS) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (15) sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{3\ fasa\ (0\%)}}{I_{set}\ (70\ kV)} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{5.503,0663}{103,400} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = 0,1773$$

Setting Relai Arus Lebih Di Sisi *Incoming* 20 kV

1. Setting Arus

$$\text{Rasio CT} = 1.000/5\ A$$

Arus nominal transformator pada sisi 20 kV dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (16) sebagai berikut:

$$I_{nominal}\ (20\ kV) = \frac{kVA_T}{\sqrt{3} V_{L-L}} = \frac{30.000}{\sqrt{3} \times 20} = 866,0254\ A$$

Setting arus untuk Relai Arus Lebih, pada sisi primer dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (17) sebagai berikut:

$$I_{set}\ (70\ kV) = 1,1 \times I_{nominal}\ (20\ kV) = 1,1 \times 866,0254 = 952,6279\ A$$

Maka setting arus untuk Relai Arus Lebih, pada sisi sekunder dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (18) sebagai berikut:

$$I_{set}\ (20\ kV) = I_{set}\ (70\ kV) \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} = 952,6279 \times \frac{1}{1.000/5} = 4,7631\ A$$

2. Setting Waktu

Setting waktu (TMS) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (19) sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{1 \text{ fasa}}^{(0\%)}}{I_{\text{set}} (70 \text{ kV})} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{5,503,0663}{952,6279} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = 0,1785 \text{ A}$$

Setting Relai Gangguan Tanah di Sisi Penyulang 20 kV (*Outgoing*)

1. Setting Arus

Arus gangguan terkecil terletak di lokasi gangguan 100% maka *setting* arus untuk Relai Gangguan Tanah dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (20) sebagai berikut:

$$I_{\text{set}} (70 \text{ kV}) = 10\% \times I_{1 \text{ fasa ke tanah}} (100\%) = 0,1 \times 238,4763 = 23,8476 \text{ A}$$

Maka *setting* arus untuk Relai Gangguan Tanah, pada sisi sekunder dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (21) sebagai berikut:

$$I_{\text{set}} (20 \text{ kV}) = I_{\text{set}} (70 \text{ kV}) \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} = 23,8476 \times \frac{1}{300/5} = 0,3975 \text{ A}$$

2. Setting Waktu

Setting waktu (*TMS*) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (22) sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{1 \text{ fasa ke tanah}}^{(0\%)}}{I_{\text{set}} (70 \text{ kV})} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{284,5463}{23,8476} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = 0,1773$$

Setting Relai Gangguan Tanah Di Sisi *Incoming* 20 kV

1. Setting Arus

Setting arus untuk Relai Gangguan Tanah pada sisi primer, dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (23) sebagai berikut:

$$I_{\text{set}} (70 \text{ kV}) = 8\% \times I_{1 \text{ fasa ke tanah}} (100\%) = 0,08 \times 238,4763 = 19,0781 \text{ A}$$

Maka *setting* arus untuk Relai Gangguan Tanah, pada sisi sekunder dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (24) sebagai berikut:

$$I_{\text{set}} (20 \text{ kV}) = I_{\text{set}} (70 \text{ kV}) \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} = 19,0781 \times \frac{1}{1.000/5} = 0,0954 \text{ A}$$

2. Setting Waktu

Setting waktu (*TMS*) dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (25) sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \times \left(\left(\frac{I_{1 \text{ fasa ke tanah}}^{(0\%)}}{I_{\text{set}} (70 \text{ kV})} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{284,5463}{19,0781} \right)^{0,02} - 1 \right)}{0,14} = 0,0992$$

Tabel 7. Waktu Kerja Relai Untuk Gangguan Hubung Singkat Berdasarkan Lokasi Gangguan

Lokasi Gangguan		Gangguan 3 Fasa (detik)			Gangguan 2 Fasa (detik)			Gangguan 1 Fasa Ke Tanah (detik)		
(%)	(Km)	Relai <i>Incoming</i>	Relai Penyulang	Selisish Waktu	Relai <i>Incoming</i>	Relai Penyulang	Selisish Waktu	Relai <i>Incoming</i>	Relai Penyulang	Selisish Waktu
0%	0,0000	0,7000	0,3000	0,4000	0,7636	0,3117	0,4519	0,7000	0,3000	0,4000
25%	4,1250	1,0108	0,3483	0,6625	1,1474	0,3640	0,7834	0,7111	0,3052	0,4059
50%	8,2500	1,4453	0,3909	1,0544	1,7393	0,4107	1,3286	0,7233	0,3109	0,4124
75%	12,3750	2,1175	0,4298	1,6877	2,8094	0,4536	2,3557	0,7364	0,3171	0,4194
100%	16,5000	3,3419	0,4663	2,8756	5,4521	0,4944	4,9577	0,7503	0,3236	0,4267

Arus Gangguan Hubung Singkat

Untuk perhitungan arus gangguan hubung singkat dilakukan disepanjang panjang jaringan dan diasumsikan titik-titik atau lokasi gangguan hubung singkat yang terjadi adalah pada lokasi 0 %, 25 %, 50 %, 75 % dan 100 % dari panjang jaringan. Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat pada Penyulang Gurami, dan dapat diketahui bahwa apabila ditinjau dari gangguan terhadap fasa, arus gangguan hubung singkat 3 fasa lebih besar daripada arus gangguan hubung singkat 2 fasa dan arus gangguan hubung singkat 1 fasa tanah. Begitu pula arus gangguan hubung singkat 2 fasa lebih besar daripada arus gangguan hubung singkat 1 fasa tanah. Selain itu besarnya arus gangguan hubung singkat berbanding terbalik dengan jarak titik gangguan atau panjang jaringan, dimana semakin jauh jarak titik gangguan maka akan semakin kecil pula nilai arus gangguan hubung singkatnya.

Setting Relai Arus Lebih Dan Relai Gangguan Tanah di Sisi Penyulang 20 kV (*Outgoing*)

Besarnya nilai *setting* relai di sisi penyulang ditentukan oleh arus beban maksimum serta rasio pada Penyulang Gurami. Relai arus lebih akan bekerja bila arus yang mengalir melebihi nilai *setting* arusnya (I_{set}), yaitu $I_{set (primer)}$ 103,4 A dan $I_{set (sekunder)}$ 1,7233 A. Relai ini bekerja dengan membaca *input* berupa besaran arus kemudian membandingkan dengan nilai *setting*, apabila nilai arus *setting* terbaca oleh relai melebihi nilai *setting*, maka relai akan mengirim perintah *trip* (lepas) kepada Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) setelah tunda waktu TMS 0,1773 detik yang diterapkan pada *setting*. Relai arus lebih memproteksi instalasi listrik terhadap gangguan antar fasa. Sedangkan untuk memproteksi terhadap gangguan fasa tanah digunakan relai gangguan tanah. Waktu kerja OCR lebih cepat daripada waktu kerja GFR, karena OCR bekerja berdasarkan penguluran arus, dimana relai akan berkerja apabila merasakan arus diatas nilai *setting*nya. GFR dirancang sebagai pengaman cadangan transformator jika terjadi gangguan hubung singkat fasa terhadap tanah, baik dalam transformator (*internal fault*) maupun gangguan eksternal (*external fault*). *Setting* arus GFR ($I_{set (primer)} = 23,8476$ A dan $I_{set (sekunder)} = 0,3975$ A) lebih kecil daripada OCR.

Setting Relai Arus Lebih Dan Relai Gangguan Tanah Di Sisi *Incoming* 20 kV

Besarnya nilai *setting* relai di sisi *incoming* 20 kV ditentukan oleh arus beban maksimum serta rasio pada Penyulang Gurami. Relai arus lebih akan bekerja bila arus yang mengalir melebihi nilai *setting* arusnya (I_{set}), yaitu $I_{set (primer)}$ 952,6279 A dan $I_{set (sekunder)}$ 4,7631 A. Relai ini bekerja dengan membaca *input* berupa besaran arus kemudian membandingkan dengan nilai *setting*, apabila nilai arus *setting* terbaca oleh relai melebihi nilai *setting*, maka relai akan mengirim perintah *trip* (lepas) kepada Pemutus Tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB) setelah tunda waktu TMS 0,1785 detik yang diterapkan pada *setting*. Relai arus lebih memproteksi instalasi listrik terhadap gangguan antar fasa. Sedangkan untuk memproteksi terhadap gangguan fasa tanah digunakan relai gangguan tanah. Waktu kerja OCR lebih cepat daripada waktu kerja GFR, karena OCR bekerja berdasarkan penguluran arus, dimana relai akan berkerja apabila merasakan arus diatas nilai *setting*nya. GFR dirancang sebagai pengaman cadangan transformator jika terjadi gangguan hubung singkat fasa terhadap tanah, baik dalam transformator (*internal fault*) maupun gangguan eksternal (*external fault*). *Setting* arus GFR ($I_{set (primer)} = 19,7081$ A dan $I_{set (sekunder)} = 0,0954$ A) lebih kecil daripada OCR.

IV. KESIMPULAN

Besarnya arus gangguan hubung singkat dipengaruhi oleh jarak titik gangguan, semakin jauh lokasi gangguan maka arus gangguan hubung singkat akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya.

Waktu kerja relai di sisi penyulang lebih cepat dibandingkan dengan waktu kerja di *incoming* dengan selisih waktu (*grading time*) rata-rata sebesar 1,34 detik. Hal ini disebabkan lokasi gangguan mempengaruhi besar kecilnya selisih waktu (*grading time*). Semakin jauh jarak lokasi gangguan, maka semakin besar selisih waktu kerja relai di *incoming*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Azis and I. K. Febrianti, “Analisis Sistem Proteksi Arus Lebih Pada Penyulang Cendana Gardu Induk Bungaran Palembang,” *Jurnal Ampere*, vol. 4, no. 2, pp. 332–344, 2019, DOI: <http://dx.doi.org/10.31851/ampere.v4i2.3468>.
- [2] A. Pauzan, A. Azis and I. K. Febrianti. “Analisa Penggunaan Recloser Untuk Memproteksi Arus Lebih Pada Jaringan Distribusi di PT. PLN (Persero) ULP Mariana Gardu Induk Prajin,” *Jurnal Surya Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 17–24, 2021, DOI: <https://doi.org/10.32502/jse.v6i1.3097>.
- [3] Emidiana, “Pengaruh Gangguan Hubung Singkat 1 Fasake Tanah Terhadap Kinerja Alternator,” *Jurnal Ampere*, vol. 2, no. 1, pp. 12–18, 2017, DOI: <http://dx.doi.org/10.31851/ampere.v2i1.1206>.
- [4] N. Nurdiana, “Analisa Gangguan Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Nakula Gardu Induk Talang Kelapa,” *Jurnal Ampere*, vol. 1, no. 1, pp. 26–36, 2016, DOI: <http://dx.doi.org/10.31851/ampere.v1i1.475>.
- [5] P. M. Anderson, *Power System Protection*, New York: Wiley–IEEE Press, 2022.
- [6] P. Kadarisman and W. Sarimun, *Koordinasi OCR dan GFR Pada Jaringan Distribusi*, Jakarta: PT PLN (Persero) Jasa Pendidikan dan Pelatihan, 2002.
- [7] T. Ardianto, A. Azis and Perawati, “Evaluasi Koordinasi Sistem Proteksi Transformator 30 MVA di PT. PLN (Persero) Gardu Induk Keramasan,” *Jurnal Surya Energy*, vol. 5, no. 2, pp. 61–66, 2021, DOI: <https://doi.org/10.32502/jse.v5i2.3095>.
- [8] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*, Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group, 2014.