

# EVALUASI KOORDINASI OCR DAN GFR DI GARDU INDUK DISTRIBUSI

Rezky Almi Ramadhan<sup>1)</sup>, Azriyenni Azhari Zakri<sup>2)</sup>

<sup>1,2)</sup>Program Studi Teknik Elektro S1, Fakultas Teknik, Universitas Riau  
Kampus Bina Widya, Jl. H. R. Soebrantas Km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru, 28293  
Jurusan Teknik Elektro Universitas Riau

E-mail : rezky.almi4731@student.unri.ac.id; azriyenni@eng.unri.ac.id

## ABSTRACT

*An electric power system must have reliable and continuously supply the need for electrical energy. One of methods to support reliability is a protection system that can handle the fault. Fault on the distribution network is short circuit fault, if it not removed immediately it will damage the equipment in its path. Protection relays commonly used on distribution networks to protect the system from short circuit fault are Over Current Relay (OCR) and Ground Fault Relay (GFR) to maintain and improve the distribution networks protection system it is necessary to evaluate the coordination of the installed relay. The protection relay coordination is when short circuit fault appear in the system , the closest relay point to the fault point will work and gives a signal to trip the circuit breaker When a short circuit fault occurs, the relay closest to the fault point will work first and if the fault current value exceeds the adjustment of the backup relay behind it, the backup relay will trip after the main relay trip. When checked, time grading on the installed conditions does not meet the IEC 60255 standard, which is 0.4-0.5 seconds. So, the adjustment is done and the time grading between OCR is obtained according to IEC 60255 standard, which is 0.402 seconds. While the GFR in the installed condition also does not meet with the IEC 60255 standard so the adjustment is performed and the evaluation time between the GFR in accordance with the IEC 60255 standard is 0.492 seconds.*

*Keywords: GFR, Protection system, OCR*

## I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik harus mempunyai keandalan yang baik dan secara kontinu dapat melayani kebutuhan energi listrik. Salah satu penunjangnya adalah sistem proteksi yang baik. Sistem proteksi adalah cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan akibat gangguan, sehingga kelangsungan penyaluran tenaga listrik di gardu induk dapat dipertahankan.

Gangguan pada sistem distribusi tenaga listrik hampir seluruhnya merupakan gangguan hubung singkat. Apabila tidak segera dihilangkan akan merusak peralatan yang dilaluinya. Gangguan hubung singkat yang terjadi pada gardu induk adalah gangguan tiga fasa, gangguan dua fasa dan gangguan satu fasa ke tanah.

Relai proteksi digunakan untuk mengatasi gangguan pada sistem distribusi. Relai proteksi merupakan peralatan listrik yang dirancang untuk

memisahkan bagian sistem tenaga listrik bila terjadi gangguan di sistem. Relai proteksi dengan kemampuan selektif yang baik dibutuhkan untuk mencapai keandalan sistem yang tinggi karena tindakan pengaman yang cepat dan tepat akan dapat mengisolir gangguan seminimal mungkin.

Relai proteksi yang biasa digunakan di gardu induk adalah *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR). Kedua alat proteksi tersebut dipasang pada sisi *incoming* dan penyulang gardu induk, maka dari itu koordinasi relai di sisi *incoming* dan penyulang harus tetap dijaga karena koordinasi antar relai menentukan keandalan suatu sistem proteksi.

Menurut penelitian yang dilakukan oleh Risangpajar, penyetelan OCR pada jaringan distribusi daya pemakaian sendiri di Unit Pembangkitan Tambak Lorok Blok I Semarang, dapat menggunakan ETAP 7.5.0 dengan cara menentukan nilai arus penyetelan dan TMS dari

masing-masing OCR pada jaringan. Pada kondisi *existing*, OCR terdekat tidak bekerja ketika terjadi gangguan sehingga tidak sesuai dengan syarat koordinasi proteksi. Terdapat OCR dengan *time grading* kurang dari 0,2 detik dan lebih dari 0,4 detik serta kurva koordinasi yang tumpang-tindih. Setelah dilakukan penyetelan ulang, OCR terdekat bekerja saat gangguan. Proteksi cadangan bekerja sesuai urutan koordinasi saat relai utama gagal dan tidak ditemukan kurva yang tumpang-tindih. *Time grading* sesuai standar IEEE 242-1986, yaitu 0,2-0,4 detik (Risangpajar, 2015).

Menurut Mochamad Dwi, GFR adalah relai yang bekerja apabila terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Hasil analisis hubung singkat satu fasa ke tanah mendapatkan arus gangguan sebesar 0,510 kA. Berdasarkan analisis yang dilakukan, didapatkan nilai penyetelan waktu kerja relai yaitu 0,29 detik pada KLP 1 dan 0,302 detik pada KLP 2 (Kuncahyo, 2017).

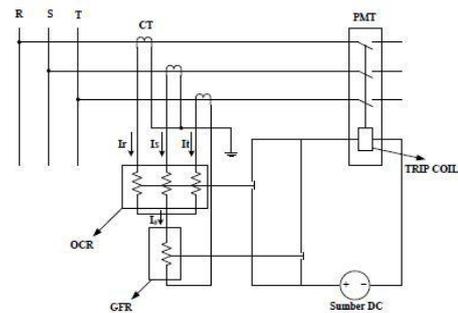
Koordinasi relai proteksi adalah ketika sistem tenaga listrik mengalami suatu gangguan, maka relai yang bekerja adalah relai terdekat dengan titik gangguan dan memberikan perintah *trip* ke PMT. Apabila relai utama gagal mengisolir gangguan, maka relai cadangan yang akan bekerja. Untuk menjaga dan meningkatkan performa sistem proteksi perlu dilakukan suatu evaluasi terhadap koordinasi relai proteksi yang terpasang.

### Sistem Proteksi

Secara umum pengertian sistem proteksi adalah cara untuk mencegah atau membatasi kerusakan peralatan listrik akibat gangguan, sehingga kelangsungan penyaluran tenaga listrik dapat dipertahankan.

### Relai Proteksi

Relai proteksi adalah peralatan listrik yang disusun untuk dapat merasakan adanya gangguan pada suatu sistem tenaga listrik. Ketika relai merasakan gangguan, secara otomatis memberi perintah untuk memutuskan *circuit breaker* dan memisahkan bagian sistem yang terganggu. Salah satu jenis relai proteksi adalah *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR). Gambar 1 adalah rangkaian pengawatan OCR dan GFR.



Gambar 1. Rangkaian Pengawatan OCR dan GFR

### OCR

Relai arus lebih atau yang lebih dikenal dengan *Over Current Relay* (OCR), merupakan peralatan yang mendeteksi adanya arus lebih, baik yang disebabkan oleh adanya gangguan hubung singkat antar fasa yang dapat merusak peralatan sistem tenaga listrik yang berada dalam wilayah pengamanannya.

Untuk penyetelan nilai arus OCR persamaannya adalah (Hakim, 2012):

$$I_{setOCR} (penyulang) = 1,1 \times I_{beban} \quad (1)$$

Sedangkan penyetelan di sisi *incoming*, persamaannya adalah (Hakim, 2012):

$$I_{setOCR} (incoming) = 1,2 \times I_{nominal\ trafo} \quad (2)$$

### GFR

Relai gangguan tanah atau *Ground Fault Relay* (GFR) pada dasarnya mempunyai prinsip kerja yang sama dengan OCR namun memiliki perbedaan dalam kegunaannya. Bila OCR mendeteksi adanya arus hubung singkat antar fasa, maka GFR mendeteksi adanya arus hubung singkat satu fasa ke tanah.

Penyetelan arus GFR di sisi penyulang persamaannya adalah (Hakim, 2012):

$$I_{setGFR} (penyulang) = 0,1 \times I_{beban} \quad (3)$$

Sedangkan di sisi *incoming* persamaannya adalah (Hakim, 2012):

$$I_{setGFR} (incoming) = 0,1 \times I_{nominal\ trafo} \quad (4)$$

### Time Multiple Setting

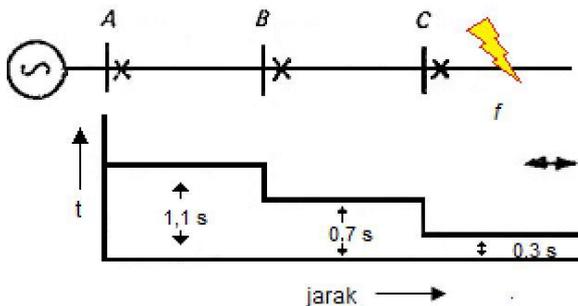
*Time Multiple Setting* (TMS) adalah nilai variabel perkalian waktu yang digunakan untuk penyetelan relai proteksi. Pada Tabel 1, relai *inverse* dapat dibedakan berdasarkan karakteristik waktu kerjanya sesuai dengan *standard* IEC 60255.

Tabel 1 Karakteristik Waktu Kerja Relai *Inverse* (Bamber dkk, 2011)

Karakteristik Relai	Standard IEC 60255
Standard Inverse	$t = \frac{0,14}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$
Very Inverse	$t = \frac{13,5}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right) - 1} \times TMS$
Extremely Inverse	$t = \frac{80}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right)^2 - 1} \times TMS$
Long Time Earth Fault	$t = \frac{120}{\left(\frac{I_f}{I_s}\right) - 1} \times TMS$

### Koordinasi Relai Proteksi

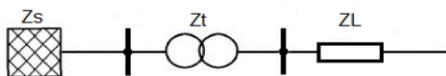
Sistem proteksi yang ditempatkan berurutan sepanjang jalur distribusi diatur sedemikian rupa sehingga akan bekerja pada waktu bertingkat atau *time grading* sesuai lokasi relai proteksi terhadap gangguan. Relai yang terdekat dengan gangguan akan bekerja lebih cepat daripada relai yang lebih jauh. Sementara itu bila relai tersebut tidak bekerja maka relai di belakangnya akan bekerja dengan waktu yang lebih lama. Gambar 2 adalah contoh *time grading* pada sistem radial.



Gambar 2 *Time Grading* pada Sistem Radial (Bamber dkk, 2011)

### Impedansi Ekuivalen

Gambar 3 adalah permodelan impedansi ekuivalen, dimana  $Z_s$  adalah impedansi sumber,  $Z_t$  adalah impedansi trafo dan  $Z_L$  adalah impedansi saluran.



Gambar 3. Diagram Permodelan Impedansi Ekuivalen

### 1. Impedansi Sumber ( $Z_s$ )

Untuk menentukan impedansi sumber pada sisi primer, persamaannya adalah (Pandjaitan, 2012):

$$Z_{s (primer)} = \frac{kV_{L-L (primer)}^2}{MVA_{SC}} \quad (5)$$

Dimana:

$Z_{s (primer)}$  = Impedansi sumber di sisi primer ( $\Omega$ )

$kV_{L-L (primer)}$  = Tegangan fasa ke fasa sisi primer (kV)

$MVA_{SC}$  = Daya gangguan hubung singkat

Untuk menentukan nilai impedansi sumber di sisi sekunder persamaannya adalah (Pandjaitan, 2012):

$$Z_{s (sekunder)} = Z_{s (primer)} \times \frac{kV_{L-L (sekunder)}^2}{kV_{L-L (primer)}^2} \quad (6)$$

Dimana:

$Z_{s (sekunder)}$  = Impedansi sumber di sisi sekunder ( $\Omega$ )

$Z_{s (primer)}$  = Impedansi sumber di sisi primer ( $\Omega$ )

$kV_{L-L (sekunder)}$  = Tegangan fasa ke fasa di sisi sekunder (kV)

$kV_{L-L (primer)}$  = Tegangan fasa ke fasa di sisi primer (kV)

### 2. Impedansi Trafo ( $Z_t$ )

Pada perhitungan impedansi suatu trafo yang diambil adalah nilai reaktansinya, sedangkan resistansinya diabaikan karena bernilai kecil. (Pandjaitan, 2012).

Berikut ini adalah cara mencari nilai impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol:

a. Untuk menghitung impedansi urutan positif dan negatif trafo persamaannya adalah (Pandjaitan, 2012):

$$Z_{t1} = Z_{t2} = \%Z \times \frac{kV_{L-L}^2}{MVA} \quad (7)$$

Dimana:

$Z_{t1}$  = Impedansi urutan positif trafo ( $\Omega$ )

$Z_{t2}$  = Impedansi urutan negatif trafo ( $\Omega$ )

$\%Z$  = Persentase impedansi trafo (%)

$kV_{L-L}$  = Tegangan fasa ke fasa (kV)

$MVA$  = Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

- b. Untuk menghitung impedansi urutan nol trafo ( $Z_{t0}$ ) persamaannya adalah (Pandjaitan, 2012):

$$Z_{t0} = 3 \times Z_{t1} \quad (8)$$

Dimana:

$Z_{t0}$  = Impedansi urutan nol trafo ( $\Omega$ )

### 3. Impedansi Penyulang ( $Z_L$ )

Impedansi penyulang terbagi menjadi impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol penyulang.

- a. Untuk menghitung nilai impedansi urutan positif dan negatif penyulang, persamaannya adalah (IEC, 2001):

$$Z_{L1} = Z_{L2} = Z_1 \text{ penghantar} \times l \quad (9)$$

Dimana:

$Z_{L1}$  = Impedansi penyulang urutan positif ( $\Omega$ )

$Z_{L2}$  = Impedansi penyulang urutan negatif ( $\Omega$ )

$Z_1$  = Impedansi kawat penyulang urutan positif ( $\Omega/\text{km}$ )

$l$  = Panjang saluran (km)

- b. Untuk menghitung nilai impedansi urutan nol penyulang, persamaannya adalah (IEC, 2001):

$$Z_{L0} = Z_0 \text{ penghantar} \times l \quad (10)$$

Dimana:

$Z_{L0}$  = Impedansi urutan nol penyulang ( $\Omega$ )

$Z_0 \text{ penghantar}$  = Impedansi urutan nol kawat penyulang ( $\Omega/\text{km}$ )

### 4. Impedansi Ekuivalen ( $Z$ )

Berikut ini adalah cara menghitung impedansi ekuivalen jaringan:

- a. Untuk menghitung impedansi urutan positif dan urutan negatif ekuivalen persamaannya adalah (IEC, 2001):

$$Z_1 = Z_2 = Z_s + Z_{t1} + Z_{L1} \quad (11)$$

Dimana:

$Z_1$  = Impedansi urutan positif ekuivalen ( $\Omega$ )

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif ekuivalen ( $\Omega$ )

$Z_s$  = Impedansi sumber ( $\Omega$ )

$Z_{t1}$  = Impedansi urutan positif trafo ( $\Omega$ )

$Z_{L1}$  = Impedansi urutan positif penyulang ( $\Omega$ )

- b. Untuk menghitung impedansi ekuivalen urutan nol persamaannya adalah (IEC, 2001):

$$Z_0 = 3R_N + Z_{t0} + Z_{L0} \quad (12)$$

Dimana:

$Z_0$  = Impedansi urutan nol ekuivalen ( $\Omega$ )

$R_N$  = Tahanan tanah ( $\Omega$ )

$Z_{t0}$  = Impedansi urutan nol trafo ( $\Omega$ )

$Z_{L0}$  = Impedansi urutan nol penyulang ( $\Omega$ )

### Gangguan Hubung Singkat

Untuk mendapatkan nilai arus gangguan hubung singkat tiga fasa, persamaannya adalah (IEC, 2001):

$$I_{f,3\phi} = \frac{V_{L-N}}{Z_1} \quad (13)$$

Dimana:

$I_{f,3\phi}$  = Arus gangguan hubung singkat tiga fasa (A)

$V_{L-N}$  = Tegangan fasa ke netral (V)

$Z_1$  = Impedansi urutan positif ( $\Omega$ )

Untuk mendapatkan nilai arus gangguan hubung singkat dua fasa, persamaannya adalah (IEC, 2001):

$$I_{f,L-L} = \frac{V_{L-L}}{Z_1 + Z_2} \quad (14)$$

Dimana:

$I_{f,L-L}$  = Arus gangguan hubung singkat dua fasa (A)

$V_{L-L}$  = Tegangan fasa ke fasa (V)

$Z_1$  = Impedansi urutan positif ( $\Omega$ )

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif ( $\Omega$ )

Untuk mendapatkan nilai arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, persamaannya adalah (IEC, 2001):

$$I_{f,L-G} = \frac{3 \times V_{L-N}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (15)$$

Dimana:

$I_{f,L-G}$  = Arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (A)

$V_{L-N}$  = Tegangan fasa ke netral (V)

$Z_1$  = Impedansi urutan positif ( $\Omega$ )

$Z_2$  = Impedansi urutan negatif ( $\Omega$ )

$Z_0$  = Impedansi urutan nol ( $\Omega$ )

## II. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian evaluasi koordinasi *over current relay* dan *ground fault relay* di gardu induk pangkalan kerinci dilakukan dengan cara mengumpulkan data *single line diagram*, data trafo, data beban, data saluran penyulang dan data relai. Data ini akan digunakan untuk melakukan perhitungan impedansi ekivalen, arus gangguan hubung singkat dan TMS.

Tabel 2 adalah data sumber tenaga yang terpasang di Gardu Induk Pangkalan Kerinci.

Tabel 2. Data *Power Grid* (PLN, 2019)

MVA <sub>sc</sub> 3 Fasa	Tegangan Nominal
1948,557	150 kV

Tabel 3 adalah data trafo tenaga di Gardu Induk Pangkalan Kerinci. Trafo tenaga yang terpasang di Gardu Induk Pangkalan Kerinci berjumlah 1 unit.

Tabel 3. Data Trafo Tenaga #1 (PLN, 2019)

Trafo Tenaga #1	
Merk	Pauwels
Kapasitas Daya	30 MVA
Tegangan Primer (L-L)	150 kV
Tegangan Sekunder (L-L)	20 kV
Impedansi (%Z)	12,5%
Arus Nominal (20 kV)	866,02 A
Hubungan Belitan	YY(d)
NGR	40 Ω

Tabel 4 adalah data panjang saluran tiap penyulang yang terhubung di Gardu Induk Pangkalan Kerinci.

Tabel 4. Data Panjang Penyulang (PLN, 2019)

Nama Penyulang	Panjang Penyulang (km)
Berlian	1,8
Zamrud	1,8
Bacan	53,1
Safir	64
Ruby	63

Tabel 5 adalah data impedansi jenis saluran penyulang. Penyulang di Gardu Induk Pangkalan Kerinci menggunakan kawat penghantar AAAC berukuran 240 mm<sup>2</sup>.

Tabel 5. Data Impedansi Jenis Saluran (SPLN 64, 1985)

Jenis Kawat Penghantar	Ukuran (mm <sup>2</sup> )	Impedansi	
		Urutan Positif dan Negatif (Ω/km)	Impedansi Urutan Nol (Ω/km)
AAAC	240	0.1344 + j0,3158	0,2824 + j1,6034

Tabel 6 adalah data *over current relay* yang terpasang di sisi *incoming* dan sisi penyulang.

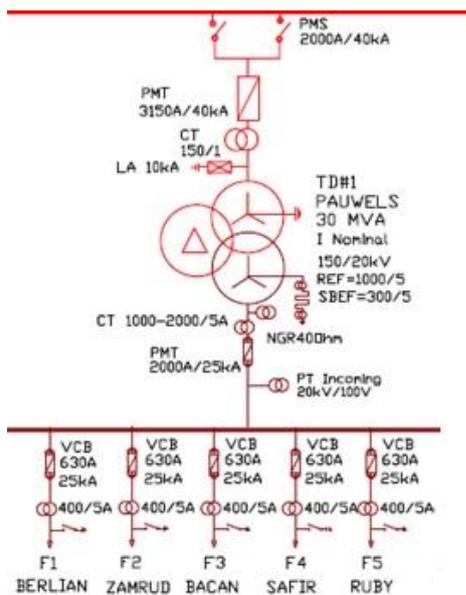
Tabel 6. Data *Over Current Relay* (PLN, 2019)

Sisi Incoming		Sisi Penyulang	
Merk	Schneider	Merk	Schneider
Tipe	P142	Tipe	P142
Kurva	IEC- <i>Standard Inverse</i>	Kurva	IEC- <i>Standard Inverse</i>
Rasio CT	1000 : 1	Rasio CT	400 : 5
I <sub>set</sub> (A)	1000	I <sub>set</sub> (A)	352
I <sub>relai</sub> (A)	1	I <sub>relai</sub> (A)	4,4
TMS	0,22	TMS	0,13

Tabel 7 adalah data *ground fault relay* yang terpasang di sisi *incoming* dan sisi penyulang.

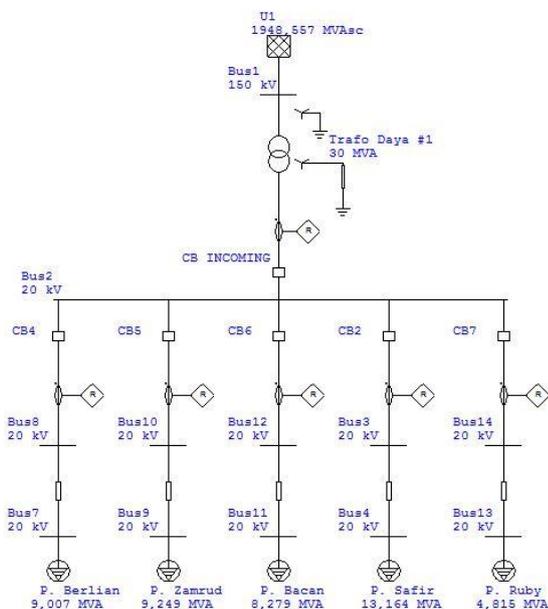
Tabel 7. Data *Ground Fault Relay* (PLN, 2019)

Sisi Incoming		Sisi Penyulang	
Merk	Schneider	Merk	Schneider
Tipe	P142	Tipe	P142
Kurva	IEC- <i>Standard Inverse</i>	Kurva	IEC- <i>Standard Inverse</i>
Rasio CT	1000 : 1	Rasio CT	400 : 5
I <sub>set</sub> (A)	100	I <sub>set</sub> (A)	32
I <sub>relai</sub> (A)	0,1	I <sub>relai</sub> (A)	0,4
TMS	0,23	TMS	0,12



Gambar 4. Single Line Diagram Gardu Induk Pangkalan Kerinci (sumber: PLN, 2019)

Gambar 4 adalah *single line diagram* Gardu Induk Pangkalan Kerinci. Tahap selanjutnya adalah permodelan *single line diagram* GI Pangkalan Kerinci menggunakan program ETAP 12.6.0 untuk menjalankan simulasi gangguan hubung singkat dan koordinasi relai. Data yang dimasukkan adalah data penyetelan ulang. Hasil simulasi relai kemudian dibandingkan dengan data relai yang terpasang di lapangan. Gambar 5 adalah permodelan *single line diagram* GI Pangkalan Kerinci menggunakan ETAP 12.6.0.



Gambar 5. Permodelan Single Line Diagram GI Pangkalan Kerinci Menggunakan ETAP 12.6.0

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini akan menjelaskan perhitungan arus gangguan hubung singkat serta penyetelan ulang OCR dan GFR. Setelah itu akan dilakukan simulasi gangguan hubung singkat, simulasi koordinasi relai, serta menampilkan kurva OCR dan GFR di sisi *incoming* dan penyulang dengan menggunakan ETAP 12.6.0 berdasarkan *single line diagram* yang telah dimodelkan. Hasil simulasi sebelum dan sesudah penyetelan ulang akan dibandingkan.

#### Menghitung Impedansi Sumber ( $Z_s$ )

Dengan menggunakan persamaan (5), maka impedansi sumber ( $Z_s$ ) adalah:

$$Z_s (\text{primer}) = \frac{150^2}{1948,557} = 11,55 \Omega$$

Untuk mengonversi impedansi di sisi primer ke sisi sekunder menggunakan persamaan (6), maka:

$$Z_s (\text{sekunder}) = 11,55 \times \frac{20^2}{150^2} = 0,205 \Omega$$

#### Menghitung Impedansi Trafo ( $Z_t$ )

Nilai impedansi urutan positif dan urutan negatif trafo didapat dengan menggunakan persamaan (7):

$$Z_{t1} = Z_{t2} = 12,5\% \times \frac{20^2}{30} = 1,66 \Omega$$

Karena trafo ini memiliki hubungan belitan YY(d) yang memiliki belitan delta di dalamnya, maka besaran  $Z_{t0}$  adalah 3 kali impedansi urutan positif trafo. Sehingga dengan menggunakan persamaan (8) maka:

$$Z_{t0} = 3 \times 1,66 = 4,98 \Omega$$

#### Menghitung Impedansi Penyulang ( $Z_L$ )

Penyulang yang dipilih sebagai acuan adalah penyulang safir. Impedansi urutan positif, urutan negatif dan urutan nol penyulang dihitung menggunakan persamaan (9) dan persamaan (10):

$$Z_1 = Z_2 = (0,1344 + j0,3158) \times 64 = 8,6016 + j20,2112 \Omega$$

$$Z_0 = (0,2824 + j1,6034) \times 64 = 18,0736 + j102,6176 \Omega$$

Dengan demikian nilai impedansi penyulang untuk lokasi gangguan dengan jarak 0% dan 100% panjang penyulangnya sebagai berikut:

1. Urutan Positif dan Urutan Negatif

$$Z_{1(0\%)} = 0\% \times (8,6016 + j20,2112) = 0$$

$$Z_{1(100\%)} = 100\% \times (8,6016 + j20,2112) = 8,6016 + j20,2112 \Omega$$

2. Urutan Nol

$$Z_{0(0\%)} = 0\% \times (18,0736 + j102,6176) = 0$$

$$Z_{0(100\%)} = 100\% \times (18,0736 + j102,6176) = 18,0736 + j102,6176 \Omega$$

**Menghitung Impedansi Ekuivalen (Z)**

Impedansi ekuivalen dihitung dengan cara menjumlahkan impedansi sumber pada sisi 20 kV, impedansi trafo dan impedansi penyulang.

Persamaan (11) digunakan untuk menghitung impedansi ekuivalen urutan positif dan urutan negatif:

$$Z_{1(0\%)} = j1,865 + 0 = j1,865 \Omega$$

$$Z_{1(100\%)} = j1,865 + 8,6016 + j20,2112 = 8,6016 + j22,0762 \Omega$$

Persamaan (12) digunakan untuk menghitung impedansi ekuivalen urutan nol:

$$Z_{0(0\%)} = 120 + j4,98 + 0 = 120 + j4,98 \Omega$$

$$Z_{0(100\%)} = 120 + j4,98 + 18,073 + j102,6176 = 138,0736 + j107,5976 \Omega$$

**Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat**

Jika nilai impedansi ekuivalen sesesuai lokasi gangguan telah didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah menghitung arus gangguan hubung singkat.

Arus gangguan hubung singkat tiga fasa dihitung menggunakan persamaan (13):

$$I_{f,3\phi(0\%)} = \frac{11547}{\sqrt{0^2 + 1,865^2}} = 6.191,42 A$$

$$I_{f,3\phi(100\%)} = \frac{11547}{\sqrt{8,6016^2 + 22,0762^2}} = 487,36 A$$

Arus gangguan hubung singkat dua fasa dihitung menggunakan persamaan (14):

$$I_{f,L-L(0\%)} = \frac{20000}{2 \times (\sqrt{0^2 + 1,865^2})} = 5.361,93 A$$

$$I_{f,L-L(100\%)} = \frac{20000}{2 \times (\sqrt{8,6016^2 + 22,0762^2})} = 422,07 A$$

Arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dihitung menggunakan persamaan (15):

$$I_{f,L-G(0\%)} = \frac{34.641,016}{2 \times (\sqrt{0^2 + 1,865^2}) + (\sqrt{120^2 + j4,98^2})} = 279,74 A$$

$$I_{f,L-G(100\%)} = \frac{34.641,016}{2 \times (\sqrt{8,6016^2 + 22,0762^2}) + (\sqrt{138,0736^2 + j107,5976^2})} = 155,73 A$$

Tabel 8 adalah rekapitulasi data arus gangguan hubung singkat menggunakan perhitungan.

Tabel 8. Data Arus Gangguan Menggunakan Perhitungan

%	Jarak (km)	Arus Gangguan Hubung Singkat (A)		
		3 Fasa	2 Fasa	1 Fasa ke Tanah
0	0	6.191,42	5361,93	279,74
100	64	487,36	422,07	155,73

**Penyetelan Ulang Relai**

1. Penyetelan ulang OCR sisi penyulang

a. Penyetelan arus OCR sisi penyulang

$$I_{set} = 1,1 \times 380 = 418 A$$

b. Penyetelan TMS OCR di sisi Penyulang

Waktu kerja (t) yang ditetapkan adalah 0,3 detik.

$$0,3 = \frac{0,14}{\left(\frac{6.260}{418}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,12$$

2. Penyetelan ulang GFR di sisi penyulang
- Penyetelan arus GFR sisi penyulang

$$I_{set} = 0,1 \times 380 = 38 \text{ A}$$

- Penyetelan TMS GFR sisi penyulang  
Waktu kerja (t) yang ditetapkan adalah 0,5 detik.

$$0,5 = \frac{0,14}{\left(\frac{287}{38}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,15$$

3. Penyetelan ulang OCR di sisi incoming
- Penyetelan arus OCR sisi incoming

$$I_{set} = 1,2 \times 866,02 = 1.039,224 \text{ A}$$

- Penyetelan TMS OCR sisi incoming  
Waktu kerja (t) yang ditetapkan adalah 0,3 + 0,4 detik.

$$0,7 = \frac{0,14}{\left(\frac{6.260}{1.039,224}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,184$$

4. Penyetelan ulang GFR di sisi incoming
- Penyetelan arus GFR sisi incoming

$$I_{set} = 0,1 \times 866,02 = 86,6 \text{ A}$$

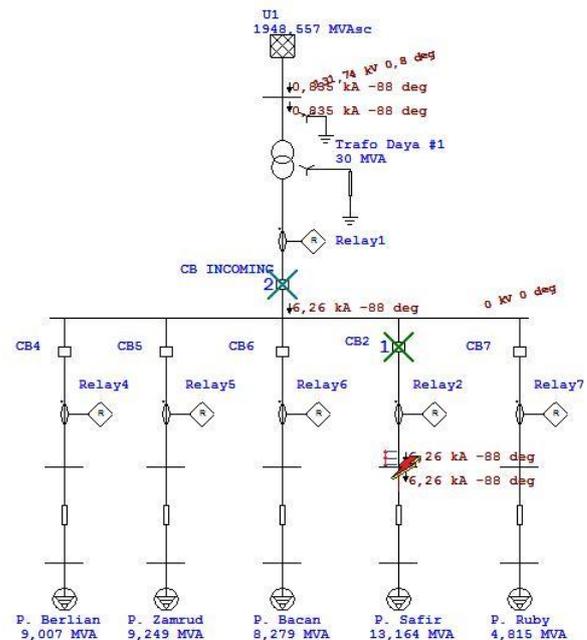
- Penyetelan TMS GFR sisi incoming  
Waktu kerja (t) yang ditetapkan adalah 1 detik.

$$1 = \frac{0,14}{\left(\frac{287}{86,6}\right)^{0,02} - 1} \times TMS$$

$$TMS = 0,173$$

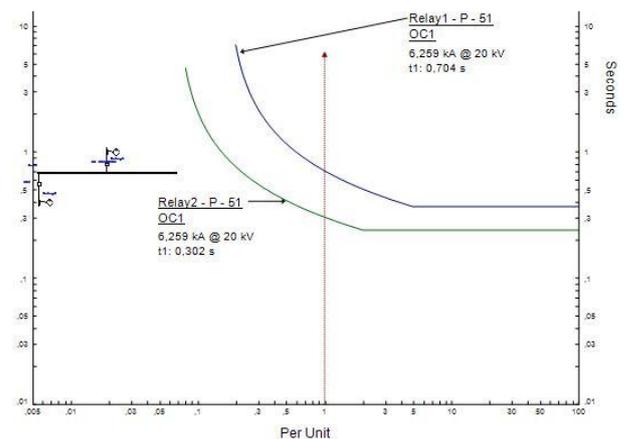
### Simulasi Koordinasi OCR saat Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

Gambar 6 adalah simulasi koordinasi OCR saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. Urutan relai yang bekerja adalah relai 2 memberikan sinyal ke CB 2 untuk *trip*, kemudian relai 1 memberikan sinyal ke CB incoming untuk *trip*.



Gambar 6 Simulasi Koordinasi OCR saat Terjadi Gangguan Tiga Fasa

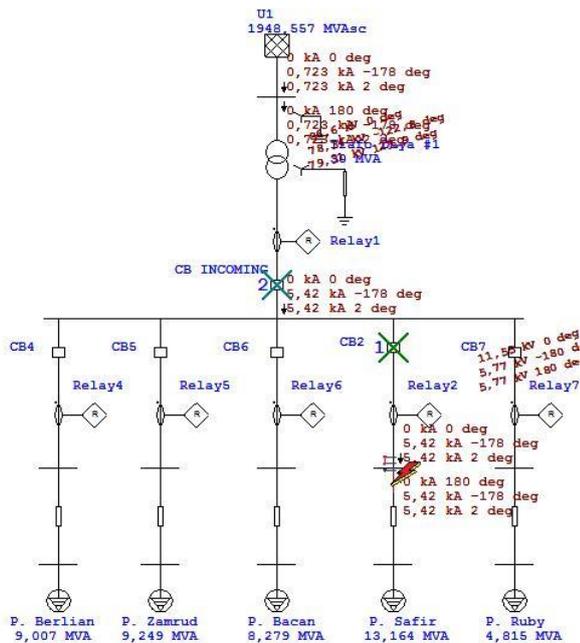
Sedangkan gambar 7 adalah kurva koordinasi waktu kerja OCR di sisi penyulang dan sisi incoming saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa. Waktu kerja relai 2 adalah 0,302 detik dan relai 1 adalah 0,704 detik. Sehingga didapatkan *time grading* sebesar 0,402 detik.



Gambar 7. Kurva Koordinasi Waktu Kerja OCR saat Terjadi Gangguan Tiga Fasa

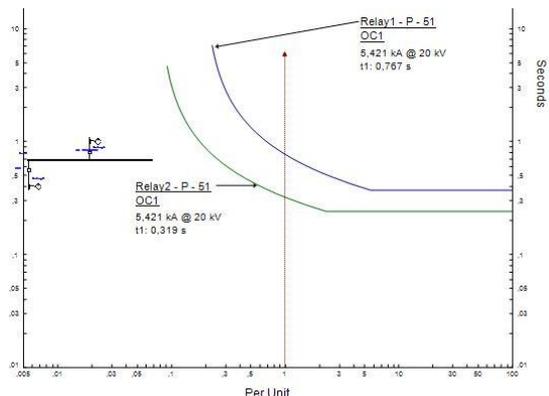
### Simulasi Koordinasi OCR saat Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Gambar 8 adalah simulasi koordinasi OCR saat terjadi gangguan hubung singkat dua fasa. Urutan relai yang bekerja adalah relai 2 memberikan sinyal ke CB 2 untuk *trip*, kemudian relai 1 memberikan sinyal ke CB incoming untuk *trip*.



Gambar 8. Simulasi Koordinasi OCR saat Terjadi Gangguan Dua Fasa

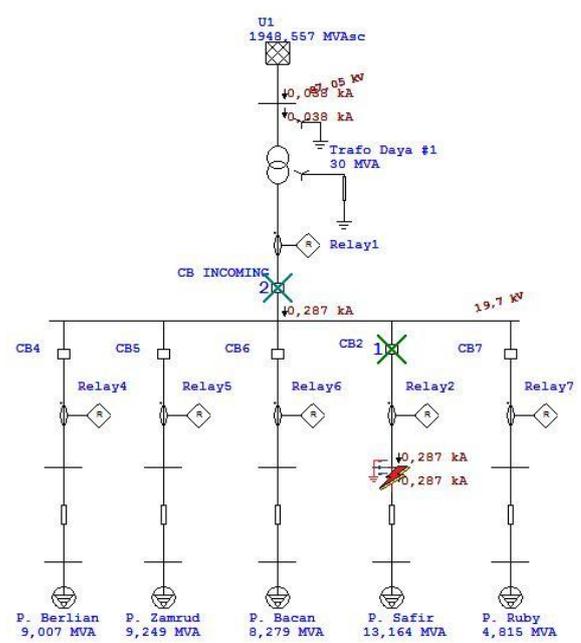
Sedangkan gambar 9 adalah kurva koordinasi waktu kerja OCR di sisi penyulang dan sisi *incoming* saat terjadi gangguan hubung singkat dua fasa. Waktu kerja relay 2 adalah 0,319 detik dan relay 1 adalah 0,767 detik. Sehingga didapatkan nilai *time grading* sebesar 0,448 detik.



Gambar 9. Kurva Koordinasi Waktu Kerja OCR saat Terjadi Gangguan Dua Fasa

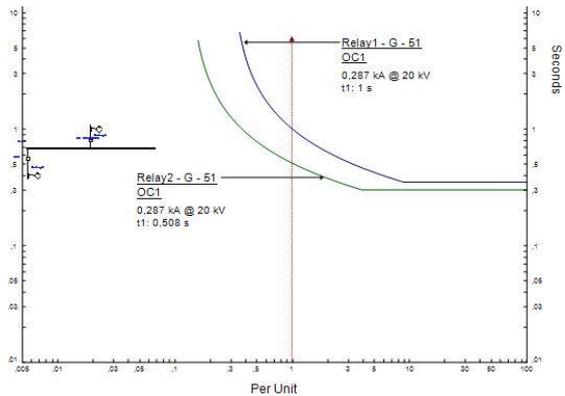
### Simulasi Koordinasi GFR saat Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah

Gambar 10 adalah simulasi koordinasi GFR saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Urutan relay yang bekerja adalah relay 2 memberikan sinyal ke CB 2 untuk *trip*, kemudian relay 1 memberikan sinyal ke CB *incoming* untuk *trip*.



Gambar 10. Simulasi Koordinasi GFR saat Terjadi Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Sedangkan gambar 11 adalah kurva koordinasi waktu kerja GFR di sisi penyulang dan sisi *incoming* saat terjadi gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Waktu kerja relay 2 adalah 0,508 detik dan relay 1 adalah 1 detik. Sehingga didapatkan nilai *time grading* sebesar 0,492 detik.



Gambar 11. Kurva Koordinasi Waktu Kerja GFR saat Terjadi Gangguan Satu Fasa ke Tanah

Berdasarkan simulasi koordinasi relay yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa setelah dilakukan penyetelan ulang relay memiliki *time grading* yang sesuai dengan IEC 60255 yaitu sebesar 0,4 - 0,5 detik. Relay yang terpasang juga bekerja sesuai dengan penyetelannya. Pada saat terjadi gangguan hubung singkat, relay yang terdekat dengan titik gangguan yang akan bekerja dan apabila nilai arus gangguan melebihi penyetelan relay cadangan yang berada di

belakangnya maka relai cadangan tersebut akan ikut *trip* dengan *time grading* sesuai rekomendasi IEC 60255. Tabel 9 adalah perbandingan *time grading* OCR setelah dilakukan penyetelan ulang dan pada saat kondisi terpasang di lapangan. Sedangkan Tabel 10 adalah perbandingan *time grading* GFR setelah dilakukan penyetelan ulang dan pada saat kondisi terpasang di lapangan.

Tabel 9. Perbandingan *Time Grading* OCR Setelah dan Sebelum Penyetelan Ulang

Data	OCR penyulang (detik)	OCR incoming (detik)	Time Grading (detik)	IEC 60255 (detik)
Hasil Penyetelan Ulang	0,302	0,704	0,402	0,4-0,5
Terpasang di Lapangan	0,307	0,824	0,52	0,4-0,5

Tabel 10. Perbandingan *Time Grading* GFR Setelah dan Sebelum Penyetelan Ulang

Data	GFR penyulang (detik)	GFR incoming (detik)	Time Grading (detik)	IEC 60255 (detik)
Hasil Penyetelan Ulang	0,508	1	0,492	0,4-0,5
Terpasang di Lapangan	0,37	1,51	1,14	0,4-0,5

#### IV. KESIMPULAN

Setelah dilakukan simulasi gangguan hubung singkat dapat disimpulkan bahwa apabila semakin jauh titik gangguan hubung singkat dari sumber tenaga, maka semakin kecil nilai arus gangguannya. Begitu juga sebaliknya ketika semakin dekat titik gangguan dengan sumber tenaga, maka nilai arus gangguan akan semakin besar. *Time grading* OCR pada kondisi terpasang tidak sesuai dengan standar IEC 60255 sehingga dilakukan penyetelan ulang dan didapatkan hasil waktu kerja OCR di sisi *incoming*  $t_{op} = 0,704$  detik dan di sisi penyulang  $t_{op} = 0,302$  detik. *Time grading* antar OCR sesuai dengan standar IEC 60255 yaitu 0,402 detik. Sedangkan *time grading* GFR pada kondisi terpasang juga tidak sesuai dengan standar IEC 60255, sehingga dilakukan penyetelan ulang dan didapatkan hasil waktu kerja

GFR di sisi *incoming*  $t_{op} = 1$  detik dan di sisi penyulang  $t_{op} = 0,508$  detik. *Time grading* antar GFR sesuai dengan standar IEC 60255 yaitu 0,492 detik.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Bamber, Michael dkk. 2011. *Network Protection and Application Guide: Protective Relays, Measurement and Control*. Paris: Alstom Grid.
- Grainger, J. J. & Stevenson, W. D. 1994. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Hakim, Yanuar. 2012. *Pengelolaan Sistem Proteksi Trafo Penyulang*. Jakarta: PLN.
- IEC. 2001. *IEC 60909-0 Short-circuit Currents in Three-Phase A.C. Systems – Part 0: Calculation of Currents*. Jenewa: International Electrotechnical Commission.
- Isradianto dan Muh. Firmansyah Fattah. 2014. *Evaluasi Sistem Proteksi Relai Differensial dan Arus Lebih Transformator Distribusi 150/20 kV 60 MVA PT. PLN (Persero) Gardu Induk Tello*. Politeknik Ujung Pandang, Volume 02, Nomor 01, April 2014.
- Kuncahyo, Mochamad Dwi. 2017. *Analisis Setting Ground Fault Relay (GFR) Terhadap Sistem Pentanahan Netral Transformator Menggunakan Metode Neutral Grounding Resistor (NGR) Pada Penyulang PLN Rayon Kuala Pembuang*. Institut Teknologi Nasional Malang, Volume 01, Nomor 01, September 2017.
- Marsudi, Djiteng. 2006. *Operasi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Panjaitan, Bonar. 2012. *Praktik-praktik Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta: Andi.
- PT. PLN (Persero). 1985. *SPLN 64: Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah*. Jakarta: Departemen Pertambangan dan Energi.
- Risangpajar, Ladislaus. 2015. *Evaluasi Koordinasi Setting Rele Proteksi OCR Pada Jaringan Distribusi Daya Pemakaian Sendiri di PT Indonesia Power Unit Pembangkitan Semarang Tambak Lorok Blok I dengan ETAP 7.5.0*. Universitas Diponegoro, Volume 04, Nomor 03, September 2015