

Koordinasi Sistem Proteksi OCR dan GFR Transformator Distribusi 20 kV PT PLN dengan *Neutral Grounding Resistor* Menggunakan Impedansi Urutan Nol

WAHYU DWI SISWANTO¹, SYAHRIAL²

Institut Teknologi Nasional Bandung
Email: wahyu.dwi@mhs.itenas.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis koordinasi sistem proteksi Over Current Relay (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR) pada transformator distribusi 20 kV PT PLN yang menggunakan sistem pentanahan Neutral Grounding Resistor (NGR) dengan pendekatan impedansi urutan nol. Tujuan penelitian adalah menentukan besarnya arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, dua fasa, dan tiga fasa serta mengevaluasi waktu kerja relai OCR dan GFR agar memenuhi prinsip selektivitas dan sensitivitas proteksi. Metode yang digunakan meliputi pengumpulan data lapangan berupa parameter transformator, panjang dan jenis saluran penyulang, impedansi penghantar, serta karakteristik relai proteksi. Perhitungan arus gangguan dilakukan berdasarkan metode komponen simetris dengan menentukan impedansi ekuivalen sistem yang terdiri dari impedansi sumber, transformator, dan saluran. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa pada kondisi menggunakan NGR, arus gangguan satu fasa ke tanah sebesar 2.835,8 A, lebih kecil dibandingkan arus gangguan dua fasa sebesar 5.869,37 A dan tiga fasa sebesar 6.777,36 A. Nilai arus gangguan satu fasa ke tanah meningkat menjadi 4552,01 A pada kondisi tanpa NGR, yang menunjukkan peran NGR dalam membatasi arus gangguan tanah. Evaluasi waktu kerja relai menunjukkan bahwa waktu kerja OCR dan GFR masing-masing berada pada rentang 0,08 s hingga 0,76 s, masih berada di bawah batas ketahanan termal transformator sebesar 2 detik. Hasil analisis ini membuktikan bahwa koordinasi relai OCR dan GFR pada sistem yang diteliti telah memenuhi standar proteksi distribusi 20 kV dan mampu memberikan keandalan serta selektivitas proteksi yang baik.

Kata kunci: arus hubung singkat, proteksi, OCR-GFR, transformator.

ABSTRACT

This study analyzes the coordination of the Overcurrent Relay (OCR) and Ground Fault Relay (GFR) protection system on a 20 kV PT PLN distribution transformer employing a Neutral Grounding Resistor (NGR) grounding system, using a zero-sequence impedance approach. The research aims to determine the magnitude of single line-to-ground, line-to-line, and three-phase short-circuit fault currents, as well as to evaluate the operating times of OCR and GFR relays to ensure compliance with the principles of selectivity and sensitivity in protection systems. The methodology includes field data collection comprising transformer parameters, feeder length and type, conductor impedance, and protective relay characteristics. Short-circuit current calculations are performed using the symmetrical components

method by determining the equivalent system impedance, which consists of source, transformer, and line impedances. The calculation results show that under NGR grounding conditions, the single line-to-ground fault current is 2,835.8 A, which is lower than the line-to-line fault current of 5,869.37 A and the three-phase fault current of 6,777.36 A. The single line-to-ground fault current increases to 4,552.01 A in the absence of NGR, demonstrating the role of NGR in limiting ground fault currents. The relay operating time evaluation indicates that OCR and GFR operating times range from 0.08 s to 0.76 s, remaining well below the transformer's thermal withstand limit of 2 seconds. These findings confirm that the OCR and GFR relay coordination in the studied system complies with 20 kV distribution protection standards and provides reliable and selective protection performance.

Keywords: protection, OCR-GFR, short-circuit currents, transformers.

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik terdiri dari tiga subsistem utama, yaitu pembangkitan, transmisi dan distribusi. Subsistem distribusi berperan sebagai penghubung akhir antara jaringan transmisi dan konsumen (**Nurdiana, 2016**). Jaringan distribusi dikelompokkan menjadi dua, yaitu jaringan distribusi primer dan jaringan distribusi sekunder (**Syahputra, 2016**). Di Indonesia, PT PLN (Persero) menggunakan tegangan 20 kV sebagai standar distribusi primer karena efisiensi dan keandalannya. Namun, jaringan distribusi 20 kV rentan terhadap gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan, kehilangan pasokan, bahkan bahaya keselamatan. Salah satu gangguan dominan pada sistem distribusi adalah gangguan arus hubung singkat, baik satu fasa ke tanah, dua fasa, maupun tiga fasa. Gangguan ini menyebabkan arus yang sangat besar dalam waktu singkat sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan serius pada transformator, penghantar, peralatan pemutus, serta menurunkan keandalan penyaluran energi listrik (**Aribowo, 2013**).

Hubung singkat satu fasa ke tanah merupakan jenis gangguan paling dominan di jaringan distribusi, mencapai lebih dari 70% dari seluruh gangguan. Dalam sistem 20 kV PT PLN yang menggunakan *Neutral Grounding Resistor* (NGR), arus gangguan hubung singkat 1 fasa dibatasi secara sengaja untuk mengurangi kerusakan termal dan mempertahankan kontinuitas pelayanan (**Suhadi, 2008**). Namun, pembatasan arus ini justru menimbulkan tantangan baru yaitu arus gangguan menjadi terlalu kecil untuk dideteksi secara andal oleh relai arus lebih konvensional. Tanpa perhitungan arus hubung singkat yang akurat dan koordinasi relai yang tepat, sistem proteksi dapat gagal *trip*, menyebabkan kerusakan peralatan atau *trip* tidak selektif, menyebabkan pemadaman area yang tidak terganggu. Oleh karena itu, perhitungan akurat arus gangguan tiga fasa, dua fasa dan satu fasa ke tanah menjadi dasar mutlak untuk menentukan *setting* relai OCR dan GFR yang selektif dan sensitif.

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Tama (2011) dan Gaffar (2017), telah membahas koordinasi OCR pada sistem 20 kV, namun tidak memasukkan pengaruh NGR dan impedansi urutan nol saluran dalam perhitungan arus gangguan satu fasa ke tanah. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan data lapangan nyata, perhitungan lengkap arus gangguan berbasis komponen simetris (urutan positif, negatif dan nol), evaluasi koordinasi waktu antara OCR dan GFR berdasarkan ketahanan *thermal* trafo (2 detik), validasi bahwa *setting* relai memenuhi prinsip selektif dan sensitif dalam sistem dengan NGR.

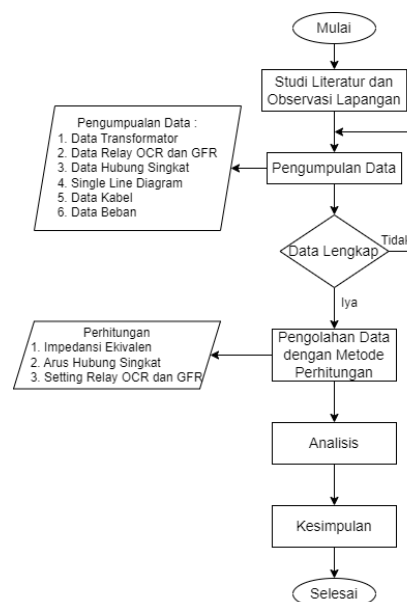
2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Diagram Alir Metode Penelitian

Proses penyusunan penelitian berjudul "Koordinasi Sistem Proteksi OCR dan GFR pada Transformator Distribusi 20 kV PT PLN dengan *Neutral Grounding Resistor* Menggunakan Impedansi Urutan Nol" diawali dengan studi literatur yang berkaitan dengan sistem distribusi tenaga listrik, gangguan hubung singkat, serta prinsip koordinasi relai proteksi. Selain itu, dilakukan observasi lapangan dan diskusi dengan pembimbing untuk memperoleh pemahaman yang komprehensif mengenai kondisi sistem serta metode pengolahan data yang digunakan. Tahapan selanjutnya adalah pengambilan data lapangan yang meliputi parameter transformator, karakteristik saluran penyulang, sistem pentanahan menggunakan *Neutral Grounding Resistor* (NGR), serta data teknis relai *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR).

Berdasarkan data yang diperoleh, dilakukan pengolahan dan analisis secara bertahap. Tahap pertama adalah perhitungan impedansi ekuivalen sistem yang diperoleh dari penjumlahan impedansi sumber, impedansi transformator, dan impedansi saluran dengan mempertimbangkan komponen urutan positif, negatif, dan nol. Selanjutnya, impedansi ekuivalen tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan arus gangguan hubung singkat untuk tiga jenis gangguan, yaitu gangguan satu fasa ke tanah, dua fasa, dan tiga fasa. Tahap akhir dalam metodologi ini adalah penentuan *setting* relai proteksi melalui perhitungan *Time Multiple Setting* (TMS) berdasarkan kurva karakteristik IEC Standard Inverse (SI), sehingga koordinasi antara relai OCR dan GFR dapat memenuhi prinsip selektivitas, sensitivitas, dan keandalan sistem proteksi.

Alur metodologi penelitian ini disajikan secara ringkas dalam bentuk diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir pengolahan data impedansi ekuivalen, arus hubung singkat dan *setting* relai OCR dan GFR

Sistem yang dianalisis adalah transformator distribusi 60 MVA 150/20 kV pada GIS Kiaracandong dengan konfigurasi jaringan radial 20 kV. Sistem pentanahan menggunakan *Neutral Grounding Resistor* (NGR) sebesar 12 Ω yang terhubung pada titik netral transformator sisi 20 kV. Penyulang yang dianalisis memiliki panjang 7,933 km dengan penghantar AL150.

Gangguan hubung singkat diasumsikan terjadi pada penyulang 20 kV pada jarak 50% dan 100% panjang saluran dari sisi transformator. Sistem proteksi menggunakan *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) dengan karakteristik IEC Standard Inverse.

2.2 Prosedur Penelitian

Dalam melakukan perhitungan, penulis terlebih dahulu mengumpulkan data-data yang dibutuhkan dalam metode perhitungan. Data yang dibutuhkan penulis sebagai berikut:

a. Data Transformator II. Hyundai 60 MVA Kiaracandong

Kapasitas transformator	: 60 MVA
Impedansi transformator	: 15,12%
Tegangan primer	: 150 kV
Tegangan sekunder	: 20 kV
Rasio CT (<i>current transformer</i>)	: 2000/5 A
Frekuensi	: 50 Hz
NGR	: 12 ohm
Fasa	: 3 Ø

b. Data saluran penyulang transformator, seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Saluran Penyulang Transformator GIS Kiaracandong

Nama Penyulang	Panjang (km)	I beban	keterangan
KSM 1	7,933	6755 KVA	GIS Kiaracandong

c. Data penghantar, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Penghantar AL150

Jenis Penghantar	Impedansi			
	Positif-negatif		Nol	
AL150	R	Jx	R	Jx
	0,265	0,106	0,798	0,265

d. Data Relai OCR dan GFR

Kurva	: IEC SI
Pabrik	: Schneider
Merek	: Mocim
Tipe	: P123
No. seri	: 36189471/02/13
In relai OCR	: 5 A
In relai GFR	: 5 A
Rasio CT	: 800/5 A

e. Data gangguan hubung singkat, seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Gangguan Hubung Singkat

Ihs 3 phase	2022.342 MVA
Ihs 1 phase	1124.129 MVA

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perhitungan

Pada perhitungan arus hubung singkat (I_{hs}) 3 fasa, 2 fasa, dan 1 fasa ke tanah, dan nilai impedansi gangguan (Z_f) = 0, tahanan pentanahan diikutsertakan dalam perhitungan impedansi urutan nol.

Perhitungan Impedansi Ekuivalen

a. Impedansi sumber

1. Impedansi sumber urutan positif dan negatif dihitung menggunakan persamaan (1)

$$Z_{s1} = Z_{s2} = \frac{Ea^2}{MVA_{hs3\phi}} = \frac{20^2}{2022,342} = 0,198 \Omega \quad (1)$$

Dimana : Z_{s1} = impedansi sumber urutan positif (Ω)
 Z_{s2} = impedansi sumber urutan negatif (Ω)
 Ea = tegangan sekunder transformator (kV)
 $MVA_{hs3\phi}$ = daya gangguan hubung singkat tiga fasa (MVA)

2. Impedansi sumber urutan nol dihitung menggunakan persamaan (2)

$$Z_{s0} = \frac{Ea^2}{MVA_{hs1\phi}} = \frac{20^2}{1124,129} = 0,356 \Omega \quad (2)$$

Dimana : Z_{s0} = impedansi sumber urutan nol (Ω)
 $MVA_{hs1\phi}$ = daya gangguan hubung singkat satu fasa (MVA)

b. Impedansi transformator

1. Impedansi transformator urutan positif dan negatif dihitung menggunakan persamaan (3)

$$Z_{t1} = Z_{t2} = \frac{Ea^2}{MVA} \times Z\% = \frac{20^2}{60} \times 15,12\% = j1,008 \Omega \quad (3)$$

Dimana : Z_{t1} = impedansi transformator urutan positif (Ω)
 Z_{t2} = impedansi transformator urutan negatif (Ω)
 MVA = kapasitas daya transformator (MVA)
 $Z\%$ = impedansi transformator (Ω)

Karena impedansi transformator didominasi oleh reaktansi bocor dan resistansi relatif kecil, maka dalam analisis hubung singkat impedansi diasumsikan bersifat induktif murni ($Z_{t1}=Z_{t2}=jX$).

2. Impedansi transformator urutan nol dihitung menggunakan persamaan (4)

$$Z_{t0} = R_N \times Z_t \quad (4)$$

Dimana : Z_{t0} = impedansi transformator urutan nol (Ω)
 R_N = nilai resistansi transformator ke tanah (NGR) (Ω)
 Z_t = impedansi transformator urutan positif/negatif (Ω)

Dalam perhitungan impedansi transformator urutan nol, peneliti melakukan perhitungan impedansi transformator urutan nol menggunakan dan tidak menggunakan sistem pentanahan (NGR).

- Impedansi transformator urutan nol menggunakan NGR

$$Z_{t0} = R_N \times Z_t = 12 \times j1,008 = j12,096 \Omega$$

- Impedansi transformator urutan nol tidak menggunakan NGR

$$Z_{t0} = Z_t = j1,008 \Omega$$

c. Impedansi saluran

Perhitungan impedansi saluran dilakukan pada panjang kabel 100% dan 50% untuk merepresentasikan gangguan pada titik terjauh dan titik tengah saluran. Pada panjang kabel 100%, impedansi saluran lebih besar sehingga arus gangguan lebih kecil, sedangkan pada panjang kabel 50% impedansi lebih kecil sehingga arus gangguan menjadi lebih besar. Panjang total kabel (L) tersebut sebesar 7,933 km.

1. Impedansi saluran urutan positif dan negatif dihitung menggunakan persamaan (5)

$$Z_{L1} = Z_{L2} = \frac{(R_{L1} + jX_{L1})}{\left(\frac{\Omega}{km}\right)} \times L(km) \quad (5)$$

Dimana : Z_{L1} = impedansi kabel urutan positif (Ω)
 Z_{L2} = impedansi kabel urutan negatif (Ω)
 R_{L1} = resistansi kabel urutan positif/negatif (Ω)
 jX_{L1} = reaktansi kabel urutan positif/negatif (Ω)
 L = panjang kabel (km)

- Impedansi saluran pada jarak 100%

$$Z_{L1} = Z_{L2} = (0,265 + j0,106) \times 7,933 = 2,102 + j0,841 \Omega$$

- Impedansi saluran pada jarak 50%

$$Z_{L1} = Z_{L2} = (0,265 + j0,106) \times 3,967 = 1,051 + j0,421 \Omega$$

2. Impedansi saluran urutan nol dihitung menggunakan persamaan (6)

$$Z_{L0} = \frac{(R_{L0} + jX_{L0})}{\left(\frac{\Omega}{km}\right)} \times L(km) \quad (6)$$

Dimana : Z_{L0} = impedansi kabel urutan nol (Ω)
 R_{L0} = resistansi kabel urutan nol (Ω)
 jX_{L0} = reaktansi kabel urutan nol (Ω)

- Impedansi saluran pada jarak 100%

$$Z_{L0} = (0,798 + j0,265) \times 7,933 = 6,331 + j2,102 \Omega$$

- Impedansi saluran pada jarak 50%

$$Z_{L0} = (0,798 + j0,265) \times 3,967 = 3,166 + j1,051 \Omega$$

d. Impedansi ekuivalen

1. Impedansi ekuivalen urutan positif dan urutan negatif dihitung menggunakan persamaan (7)

$$Z_{1ekuiiv} = Z_{2ekuiiv} = Z_{s1} + Z_{t1} + Z_{L1} \quad (7)$$

Dimana : $Z_{1ekuiiv}$ = impedansi ekuivalen urutan positif (Ω)
 $Z_{2ekuiiv}$ = impedansi ekuivalen urutan negatif (Ω)

2. Impedansi ekuivalen urutan nol dihitung menggunakan persamaan (8)

$$Z_{0ekuiiv} = Z_{s0} + Z_{t0} + Z_{L0} \quad (8)$$

Dimana : $Z_{0ekuiiv}$ = impedansi ekuivalen urutan nol

- Impedansi ekuivalen menggunakan NGR pada jarak 100%

- Impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif

$$Z_{1ekuiiv} = Z_{2ekuiiv} = (0,198) + (j1,008) + (2,102 + j0,841) = 2,3 + j1,849 \Omega$$

- Impedansi ekuivalen urutan nol

$$Z_{0ekuiiv} = (0,356) + (j12,096) + (6,331 + j2,102) = 6,687 + j14,198 \Omega$$

- Impedansi ekuivalen menggunakan NGR pada jarak 50%

- Impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif

$$Z_{1ekuiiv} = Z_{2ekuiiv} = (0,198) + (j1,008) + (1,051 + j0,421) = 1,249 + j1,429 \Omega$$

- Impedansi ekuivalen urutan nol

$$Z_{0ekuiiv} = (0,356) + (j12,096) + (3,166 + j1,051) = 3,522 + j13,147 \Omega$$

- Impedansi ekuivalen tidak menggunakan NGR pada jarak 100%

- Impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif

$$Z_{1ekuiiv} = Z_{2ekuiiv} = (0,198) + (j1,008) + (2,102 + j0,841) = 2,3 + j1,849 \Omega$$

- Impedansi ekuivalen urutan nol

$$Z_{0ekuiiv} = (0,356) + (j1,008) + (6,331 + j2,102) = 6,687 + j3,11 \Omega$$

- Impedansi ekuivalen tidak menggunakan NGR pada jarak 50%

- Impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif

$$Z_{1ekuiiv} = Z_{2ekuiiv} = (0,198) + (j1,008) + (1,051 + j0,421) = 1,249 + j1,429 \Omega$$

- Impedansi ekuivalen urutan nol

$$Z_{0ekuiiv} = (0,356) + (j1,008) + (3,166 + j1,051) = 3,522 + j2,059 \Omega$$

Perhitungan Gangguan Hubung Singkat

- a. Arus hubung singkat satu fasa ke tanah dihitung menggunakan persamaan (9)

$$I_{hs1\emptyset} = \frac{3 \times E_a}{Z_{1ekuiiv} + Z_{2ekuiiv} + Z_{0ekiv} + (3 \times Z_f)} \quad (9)$$

- Dimana : $I_{hs1\emptyset}$ = arus hubung singkat satu fasa ke tanah (A)
 E_a = tegangan fasa-netral (V)
 $Z_{1ekuiiv}$ = impedansi ekuivalen urutan positif (Ω)
 $Z_{2ekuiiv}$ = impedansi ekuivalen urutan negatif (Ω)
 $Z_{0ekuiiv}$ = impedansi ekuivalen urutan nol (Ω)
 Z_f = impedansi gangguan (Ω)

Pada perhitungan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, impedansi gangguan (Z_f) dianggap sangat kecil dibandingkan dengan impedansi ekuivalen, sehingga pengaruhnya dapat diabaikan dan diasumsikan bernilai nol.

- Arus hubung singkat satu fasa ke tanah menggunakan NGR pada jarak 100%

$$I_{hs1\emptyset} = \frac{3 \times 20.000}{(2,3 + j1,849) + (2,3 + j1,849) + (3,522 + j13,147)} = \frac{3 \times 20.000}{11,287 + j17,896} = \frac{3 \times 20.000 \angle 0^\circ}{21,158 \angle 57,76^\circ} = 2.835,8 \angle -57,76^\circ A$$

- Arus hubung singkat satu fasa ke tanah menggunakan NGR pada jarak 50%

$$I_{hs1\emptyset} = \frac{3 \times 20.000}{(1,249 + j1,429) + (1,249 + j1,429) + (6,687 + j14,198)} = \frac{3 \times 20.000}{9,185 + j17,056} = \frac{3 \times 20.000 \angle 0^\circ}{19,372 \angle 61,69^\circ} = 3.097,25 \angle -61,69^\circ A$$

- Arus hubung singkat satu fasa ke tanah tidak menggunakan NGR pada jarak 100%

$$I_{hs1\emptyset} = \frac{3 \times 20.000}{(2,3 + j1,849) + (2,3 + j1,849) + (6,687 + j3,11)} = \frac{3 \times 20.000}{11,287 + j6,808} = \frac{3 \times 20.000 \angle 0^\circ}{13,181 \angle 31,09^\circ} = 4.552,01 \angle -31,09^\circ A$$

- Arus hubung singkat satu fasa ke tanah tidak menggunakan NGR pada jarak 50%

$$I_{hs1\emptyset} = \frac{3 \times 20.000}{(1,249 + j1,429) + (1,249 + j1,429) + (3,522 + j2,059)} = \frac{3 \times 20.000}{6,02 + j4,917} = \frac{3 \times 20.000 \angle 0^\circ}{7,773 \angle 39,24^\circ} = 7.719,02 \angle -39,24^\circ A$$

Berdasarkan hasil perhitungan, penggunaan NGR secara signifikan menurunkan arus hubung singkat satu fasa ke tanah dibandingkan kondisi tanpa NGR, karena NGR menambah impedansi ekuivalen urutan nol pada lintasan gangguan. Selain itu, kondisi jarak gangguan 50% arus gangguan yang dihasilkan lebih besar dibandingkan pada jarak 100% akibat impedansi saluran yang lebih kecil, baik pada sistem dengan NGR maupun tanpa NGR. Hal ini menunjukkan bahwa semakin dekat lokasi gangguan ke sumber dan semakin kecil impedansi ekuivalen, maka arus gangguan satu fasa ke tanah yang mengalir akan semakin besar.

- b. Arus hubung singkat dua fasa dihitung menggunakan persamaan (10)

$$I_{hs2\emptyset} = \frac{\sqrt{3} \times E_a}{Z_{1ekuiiv} + Z_{2ekuiiv} + (3 \times Z_f)} \quad (10)$$

- Dimana : $I_{hs2\emptyset}$ = arus hubung singkat dua fasa (A)

- Arus hubung singkat dua fasa pada jarak 100%

$$I_{hs2\emptyset} = \frac{\sqrt{3} \times 20.000}{(2,3 + j1,849) + (2,3 + j1,849)} = \frac{\sqrt{3} \times 20.000}{4,6 + j3,698} = \frac{\sqrt{3} \times 20.000 \angle 0^\circ}{5,902 \angle 38,79^\circ} = 5.869,37 \angle -38,79^\circ A$$

- Arus hubung singkat dua fasa pada jarak 50%

$$I_{hs2\emptyset} = \frac{\sqrt{3} \times 20.000}{(1,249+j1,429)+(1,249+j1,429)} = \frac{\sqrt{3} \times 20.000}{2,498 + j2,858} = \frac{\sqrt{3} \times 20.000 \angle 0^\circ}{3,796 \angle 48,84^\circ} = 9.125,66 \angle -48,84^\circ \text{ A}$$

c. Arus hubung singkat tiga fasa dihitung menggunakan persamaan (11)

$$I_{hs3\emptyset} = \frac{E_a}{Z^1 + Z_f} \quad (11)$$

Dimana : $I_{hs3\emptyset}$ = arus hubung singkat tiga fasa (A)

➤ Arus hubung singkat tiga fasa pada jarak 100%

$$I_{hs3\emptyset} = \frac{E_a}{Z_{1ekuiiv} + Z_f} = \frac{20.000}{2,3 + j1,849} = \frac{20.000 \angle 0^\circ}{2,951 \angle 38,79^\circ} = 6.777,36 \angle -38,79^\circ \text{ A}$$

➤ Arus hubung singkat tiga fasa pada jarak 50%

$$I_{hs3\emptyset} = \frac{E_a}{Z_{1ekuiiv} + Z_f} = \frac{20.000}{1,249 + j1,429} = \frac{20.000 \angle 0^\circ}{1,898 \angle 48,84^\circ} = 10.537,4 \angle -48,84^\circ \text{ A}$$

Tabel 4 dan Tabel 5 berturut-turut menunjukkan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dan hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat dua dan tiga fasa.

Tabel 4. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat satu fasa ke tanah

No	Jenis arus gangguan	Jarak 100% (A)	Jarak 50% (A)
1	arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah dengan NGR	2.835,80	3.097,25
2	arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah tanpa NGR	4.552,01	7.719,02

Tabel 5. Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat dua dan tiga fasa

No	Jenis arus gangguan	Jarak 100% (A)	Jarak 50% (A)
1	arus gangguan hubung singkat dua fasa	5.869,37	9.125,66
2	arus gangguan hubung singkat tiga fasa	6.777,36	10.537,40

Perhitungan *Setting* Waktu Relai OCR dan GFR

Menurut standar IEC, ketahanan transformator terhadap gangguan hubungan singkat eksternal adalah dua detik, maka nilai *setting* waktu relai OCR dan GFR yang didapatkan dari hasil perhitungan diharapkan tidak melebihi nilai yang diinginkan. Persamaan (12) sampai (16) berturut-turut menunjukkan arus nominal, rasio, CT, arus relai dan arus kerja relai, serta penalaan waktu kerja relai.

a. OCR

1. Arus nominal

$$I_n = I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base}} = \frac{60MVA}{\sqrt{3} \times 20kV} = 1.732 \text{ A} \quad (12)$$

Dimana : $I_n = I_{base}$ = arus nominal (A)

S_{base} = Kapasitas daya transformator (VA)

V_{base} = tegangan sekunder transformator (V)

2. Rasio CT

$$Rasio\ CT = \frac{primer}{sekunder} = \frac{800}{5} \quad (13)$$

3. Arus yang mengalir melalui relai

$$I_{relai} = I_{base} \times \frac{1}{rasio\ CT} = 1.732 \times \frac{1}{800/5} = 10,825\ A \quad (14)$$

4. Arus kerja relai (standar OCR 110%)

$$I_{setOCR} = 1,1 \times I_{base} = 1,1 \times 1.732 = 1.905,2\ A \quad (15)$$

5. *Time Multiple Setting* (TMS)

$$TMS = \frac{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setOCR}}\right)^{0.02} - 1}{0.14} \times t_{OCR} \quad (16)$$

Dimana : t_{OCR} = waktu *setting* relai OCR (s)
 I_{hs} = arus gangguan hubung singkat fasa-fasa (A)

Waktu *setting* relai OCR ditetapkan sebesar 0,4 detik. Nilai ini dipilih berdasarkan pertimbangan koordinasi proteksi agar relai memiliki waktu tunda yang cukup untuk menghindari gangguan sementara serta menjaga selektivitas dengan relai pada sisi hilir. Rentang waktu 0,3-0,5 detik merupakan nilai standar IEC yang digunakan pada relai OCR *inverse* di sistem distribusi tegangan menengah.

➤ TMS gangguan arus hubung singkat pada jarak 100%

- Arus hubung singkat tiga fasa

$$TMS = \frac{\left(\frac{6.777,36}{1.905,2}\right)^{0.02} - 1}{0.14} \times 0,4 = 0,073\ s$$

- Arus hubung singkat dua fasa

$$TMS = \frac{\left(\frac{5.869,37}{1.905,2}\right)^{0.02} - 1}{0.14} \times 0,4 = 0,065\ s$$

➤ TMS gangguan arus hubung singkat pada jarak 50%

- Arus hubung singkat tiga fasa

$$TMS = \frac{\left(\frac{10.537,4}{1.905,2}\right)^{0.02} - 1}{0.14} \times 0,4 = 0,099\ s$$

- Arus hubung singkat dua fasa

$$TMS = \frac{\left(\frac{9.125,66}{1.905,2}\right)^{0.02} - 1}{0.14} \times 0,4 = 0,091\ s$$

6. Waktu operasi

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{I_{hs}}{I_{setOCR}}\right)^{0.02} - 1} \times TMS \quad (17)$$

Dimana t merupakan waktu operasi yang digunakan untuk pelepasan *circuit breaker I*. Perhitungan TMS dilakukan dengan menggunakan persamaan (16), karakteristik *inverse* sesuai standar IEC, dimana arus gangguan hubung singkat dan arus *setting* relai

digunakan sebagai parameter utama. Setelah mendapatkan nilai TMS diperoleh persamaan waktu operasi dengan menggunakan persamaan (17). Waktu operasi digunakan untuk memverifikasi bahwa relai bekerja pada waktu yang telah ditetapkan. Dengan demikian, penggunaan perhitungan TMS dan waktu operasi ini memastikan bahwa relai OCR mampu bekerja secara selektif, andal dan sesuai dengan standar sistem proteksi tenaga listrik.

➤ Waktu operasi gangguan arus hubung singkat pada jarak 100%

- Arus hubung singkat tiga fasa

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{6.777,36}{1.905,2}\right)^{0.02} - 1} \times 0,073 = 0,397 \text{ s}$$

- Arus hubung singkat dua fasa

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{5.869,37}{1.905,2}\right)^{0.02} - 1} \times 0,065 = 0,4 \text{ s}$$

➤ Waktu operasi gangguan arus hubung singkat pada jarak 50%

- Arus hubung singkat tiga fasa

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{10.537,4}{1.905,2}\right)^{0.02} - 1} \times 0,099 = 0,398 \text{ s}$$

- Arus hubung singkat dua fasa

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{9.125,66}{1.905,2}\right)^{0.02} - 1} \times 0,091 = 0,4 \text{ s}$$

b. GFR

1. Arus *setting* primer

$$I_{setprimer} = 10\% \times I_n = 10\% \times 1.732 = 173,2 \text{ A} \quad (18)$$

2. Arus setting CT GFR

$$I_{setGFR} = I_{setprimer} \times \frac{1}{rasio \text{ CT}} = 173,2 \times \frac{1}{800/5} = 1,085 \text{ A} \quad (19)$$

3. *Time Multiple Setting* (TMS)

$$TMS = \frac{\left(\frac{I_{hs1\phi}}{I_{setGFR}}\right)^{0.02} - 1}{0.14} \times t_{GFR} \quad (20)$$

Dimana : t_{GFR} = waktu *setting* relai GFR (s)

$I_{hs1\phi}$ = arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah (A)

Persamaan (18) sampai persamaan (20) berturut-turut menunjukkan cara perhitungan arus *setting* primer, arus *setting* CT dan *setting* waktu relai GFR. Waktu *setting* relai GFR ditetapkan sebesar 0,6 detik. Nilai ini dipilih berdasarkan pertimbangan koordinasi proteksi dengan relai OCR, dimana relai GFR diatur bekerja lebih lambat untuk menghindari gangguan tanah sementara serta menjaga selektivitas sistem proteksi. Selisih waktu sebesar 0,2 detik terhadap waktu kerja OCR dianggap cukup untuk menjamin koordinasi yang baik dan dalam rentang *setting* waktu yang 0,5-0,8 detik.

➤ Arus hubung singkat satu fasa ke tanah menggunakan NGR

$$TMS = \frac{\left(\frac{2.835,8}{1,085}\right)^{0.02} - 1}{0.14} \times 0,6 = 0,73 \text{ s}$$

- Arus hubung singkat satu fasa ke tanah tanpa NGR

$$TMS = \frac{\left(\frac{4.552,01}{1,085}\right)^{0.02} - 1}{0.14} \times 0,6 = 0,77 \text{ s}$$

4. Waktu operasi

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{I_{hs1\phi}}{I_{setGFR}}\right)^{0.02} - 1} \times TMS \tag{21}$$

Persamaan (21) menunjukkan waktu operasi yang digunakan untuk pelepasan *circuit breaker* (s). Perhitungan waktu operasi relai GFR dilakukan untuk memastikan bahwa relai bekerja sesuai dengan waktu *setting* yang telah ditetapkan. Hasil perhitungan menunjukkan waktu operasi relai sama dengan waktu setting GFR, sehingga nilai TMS yang digunakan telah sesuai dan koordinasi proteksi dapat terjaga.

- Waktu operasi gangguan arus hubung singkat satu ke tanah menggunakan NGR

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{2.835,8}{1,085}\right)^{0.02} - 1} \times 0,73 = 0,6 \text{ s}$$

- Waktu operasi gangguan arus hubung singkat satu ke tanah tanpa NGR

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{4.552,01}{1,085}\right)^{0.02} - 1} \times 0,77 = 0,594 \text{ s}$$

Tabel 6 menunjukkan hasil perhitungan TMS menggunakan NGR.

Tabel 6. Perhitungan TMS menggunakan NGR

No	Jenis arus gangguan	Hasil (s)
1	arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah	0,73
2	arus gangguan hubung singkat dua fasa	0,065
3	arus gangguan hubung singkat tiga fasa	0,073

3.2 Analisis

Penerapan sistem proteksi pada transformator sisi 20 kV bertujuan untuk membatasi dampak kerusakan yang ditimbulkan oleh gangguan hubung singkat. *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR) digunakan untuk mendeteksi gangguan antar fasa maupun gangguan satu fasa ke tanah, kemudian memberikan perintah pemutusan kepada pemutus tenaga (CB) agar bagian sistem yang terganggu dapat segera dipisahkan dari bagian yang masih beroperasi. Berdasarkan hasil perhitungan arus gangguan, diketahui bahwa pada kondisi menggunakan *Neutral Grounding Resistor* (NGR), arus gangguan satu fasa ke tanah sebesar 2.835,8 A, lebih rendah dibandingkan arus gangguan dua fasa sebesar 5.869,37 A dan tiga fasa sebesar 6.777,36 A. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pentanahan melalui tahanan efektif dalam membatasi arus gangguan tanah sehingga dapat mengurangi risiko kerusakan peralatan.

Pada kondisi sistem tanpa NGR, arus gangguan satu fasa ke tanah meningkat secara signifikan hingga mencapai 4.552,01 A, dimana nilainya mendekati arus gangguan antar fasa. Peningkatan ini berpotensi menimbulkan kerusakan yang lebih besar serta mengurangi selektivitas sistem proteksi. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Gaffar (2017) yang

menyatakan bahwa ketiadaan pembatas arus gangguan tanah pada jaringan distribusi 20 kV menyebabkan besarnya arus gangguan yang mengalir ke sistem.

Selain konfigurasi pentanahan, panjang saluran juga mempengaruhi karakteristik gangguan dan respon relai proteksi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa arus gangguan satu fasa ke tanah pada jarak gangguan 50% panjang saluran sebesar 3.097,25 A, lebih besar dibandingkan kondisi gangguan pada 100% panjang saluran yaitu 2.835,8 A. Arus gangguan yang lebih besar pada lokasi yang lebih dekat ke gardu induk menyebabkan relai bekerja lebih cepat. Hal ini tercermin dari nilai *Time Multiple Setting* (TMS), di mana waktu kerja relai untuk gangguan satu fasa ke tanah pada 100% panjang saluran adalah 0,73 s, sedangkan pada 50% panjang saluran menjadi 0,77 s. Untuk gangguan dua fasa dan tiga fasa, waktu kerja relai masing-masing sebesar 0,065 s dan 0,073 s, yang menunjukkan bahwa relai memberikan respon yang lebih cepat terhadap gangguan dengan arus yang lebih besar.

Secara keseluruhan, hasil perhitungan dan evaluasi koordinasi relai menunjukkan bahwa *setting* relai OCR dan GFR telah memenuhi prinsip selektivitas dan sensitivitas, di mana relai yang berada paling dekat dengan titik gangguan akan bekerja terlebih dahulu. batas ketahanan termal transformator sebesar 2 detik, sehingga sistem proteksi dinilai aman dan andal (**Winders, 2002**) sesuai dengan rekomendasi yang disampaikan oleh Saadat (1999) dan panduan aplikasi relai WECC (1989).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan dari hasil perhitungan yang penulis lakukan, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penggunaan *Netral Grounding Resistor* (NGR) secara signifikan menurunkan arus gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah. Pada jarak 100%, arus gangguan satu fasa ke tanah dengan NGR sebesar 2.835,8 A, sedangkan tanpa NGR meningkat menjadi 4.552,01 A, atau lebih besar sekitar 60,5%. Pada jarak 50%, arus gangguan dengan NGR sebesar 3.097,25 A, sedangkan tanpa NGR meningkat menjadi 7.719,02 A, atau meningkat sekitar 149%, sehingga dapat disimpulkan bahwa NGR efektif dalam membatasi arus gangguan satu fasa ke tanah.
- b. Variasi jarak gangguan berpengaruh langsung terhadap besarnya arus hubung singkat. Pada seluruh jenis gangguan, arus gangguan pada jarak 50% lebih besar dibandingkan jarak 100% akibat impedansi saluran yang lebih kecil. Sebagai contoh, arus gangguan satu fasa ke tanah dengan NGR meningkat dari 2.835,8 A pada jarak 100% menjadi 3.097,25 A pada jarak 50%, sedangkan tanpa NGR meningkat dari 4.552,01 A menjadi 7.719,02 A.
- c. Untuk gangguan antar fasa, hasil perhitungan menunjukkan bahwa arus gangguan tiga fasa memiliki nilai paling besar dibandingkan gangguan dua fasa. Pada jarak 100%, arus gangguan dua fasa sebesar 5.869,37 A, sedangkan arus gangguan tiga fasa sebesar 6.777,36 A. Pada jarak 50%, arus gangguan dua fasa meningkat menjadi 9.125,66 A, dan arus gangguan tiga fasa mencapai 10.537,4 A. Hal ini menegaskan bahwa gangguan tiga fasa merupakan kondisi gangguan terberat dalam sistem distribusi.
- d. Hasil perhitungan TMS menggunakan NGR menunjukkan adanya perbedaan pengaturan waktu kerja relai untuk setiap jenis gangguan. Nilai TMS untuk gangguan satu fasa ke tanah sebesar 0,73 s, sedangkan untuk gangguan dua fasa dan tiga fasa masing-masing

sebesar 0,065 s dan 0,073 s. Perbedaan ini menunjukkan bahwa relai GFR disetel dengan waktu kerja lebih lambat dibandingkan relai OCR untuk gangguan antar fasa, guna menjaga selektivitas dan mencegah *trip* yang tidak diperlukan akibat gangguan tanah.

DAFTAR RUJUKAN

- Aribowo, D., & Rahmawaty, A. (2013). Sistem Pendingin Generator PT Indonesia Power UBP Suralaya Menggunakan Hidrogen. *Jurnal Ilmiah Setrum (Sistem Kendali-Tenaga-Elektronika-Telekomunikasi-Komputer)*, 2(1), 1-5.
- Gaffar, A., Agussalim, A., & Arisandi, D. (2017). Analisis Gangguan Hubung Singkat pada Jaringan Distribusi 20 kV di Gardu Induk Panakkukang. *Jurnal Teknologi Elekterika*, 14(2), 156-162.
- Nurdiana, N. (2016). Analisa Gangguan Arus Hubung Singkat Pada Penyulang Nakula Gardu Induk Talang Kelapa. *Jurnal Ampere*, 1(1), 26-35.
- Saadat, H. (1999). *Power system analysis*. 2. McGraw-Hill.
- Suhadi, S. M. K. (2008). *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid I*. Departemen Pendidikan Nasional, Jakarta.
- Syahputra, R. (2017). *Transmisi dan Distribusi Tenaga Listrik*. LP3M UMY, Yogyakarta, 249-256.
- Tama, R. A. E. (2011). *Analisa Koordinasi Proteksi Relai Arus Lebih (OCR) pada Trafo dengan Penyulang 20 kV di Gard Induk PT. PLN*. Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana, Jakarta.
- Winders, J. J. Jr. (2002). *Power Transformers - Principles and Applications*. Marcel Dekker, Inc. NY. USA.