

ANALISIS KOORDINASI SISTEM PROTEKSI PENYULANG DIENG-2 (DNG02) TERHADAP GANGGUAN ARUS HUBUNG SINGKAT GARDU INDUK DIENG PT PLN (PERSERO) UP3 PURWOKERTO

ANALYSIS OF COORDINATION OF DIENG-2 (DNG02) PROTECTION PROTECTION SYSTEM FOR CURRENT DISORDERS OF DIENG STATE GARDU BRAKE PT PLN (PERSERO) UP3 PURWOKERTO

Daru Tri Nugroho*¹, Arief Wisnu Wardhana¹, Aida Wahyumi¹

*Email: daru.nugroho@unsoed.ac.id

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto

Abstrak— Gangguan yang sering terjadi pada sistem distribusi adalah gangguan arus hubung singkat. Untuk itu sistem proteksi dipasang di penyulang gardu induk. Pada penyulang Dieng-2 periode Januari 2019- September 2019 telah terjadi *trip* sebanyak tujuh kali. Peralatan sistem proteksi utama pada penyulang terdiri dari *Over Current Relay* (OCR), *Ground Fault Relay* (GFR), dan *recloser*. Untuk mengetahui koordinasi sistem proteksi penyulang yang baik diperlukan perhitungan arus nominal trafo, reaktansi sumber, reaktansi trafo, impedansi, dan arus hubung singkat. Hasil perhitungan arus hubung singkat akan menjadi dasar dalam menentukan waktu kerja dan selisih waktu kerja (Δt) relai antara Pemutus Tenaga (PMT) *outgoing* dan *recloser*. Pada *setting* awal relai, terdapat relai yang bekerja tidak sesuai koordinasi. Pengaturan ulang nilai tms relai diperlukan untuk menyesuaikan waktu kerja (T_k) 0,7 s dan 0,3 s dengan Δt 0,4 s. Sehingga relai dan *recloser* bekerja sesuai dengan koordinasi proteksi penyulang yang memenuhi standar PLN dan standar IEC 60255.

Kata kunci — Gangguan arus hubung singkat, *over current relay*, *ground fault relay*, *recloser*

Abstract— Disturbances that often occur in distribution systems are short-circuit current faults. For this reason, a protection system is installed in the feeder substation feeder. In the Dieng-2 feeder, the period January 2019-September 2019, seven trips occurred. The main protection system equipment in feeders consists of over current relays (OCR), ground fault relays (GFR), and reclosers. To know the coordination of a good feeder protection system, it is necessary to calculate the transformer nominal current, source reactance, transformer reactance, impedance, and short circuit current. The results of calculating the short circuit current will be the basis in determining the working time and the difference in working time (Δt) relay between the outgoing PMT and the recloser. In the initial setting of the relay, there are relays that work not according to coordination. Resetting the relay's tms value is needed to adjust the working time (T_k) of 0.7 s and 0.3 s to Δt 0.4 s. So that the relay and recloser work in accordance with the coordination of feeder protection that meets PLN standards and IEC 60255 standards..

Keywords — Short circuit current fault, *over current relay*, *ground fault relay*, *recloser*.

I. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik milik PT PLN (persero) dalam melakukan proses penyaluran energi listrik sampai ke konsumen terbagi menjadi beberapa sub sistem yaitu sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi [1]. Sistem tenaga listrik harus memiliki sistem yang handal dan berkualitas sehingga dapat menyalurkan energi listrik secara

kontinyu dari pusat pembangkit hingga ke konsumen. Sebuah sistem tenaga listrik dapat dikatakan handal apabila sistem tersebut mampu mengatasi gangguan listrik yang timbul baik dari dalam peralatan (gangguan permanen) maupun faktor luar peralatan (gangguan temporer) dengan cepat, aman, dan selektif tanpa harus melakukan pemadaman total. Untuk mencegah terjadinya gangguan pada sistem

tenaga listrik, diperlukan sistem proteksi untuk melakukan pengamanan pada peralatan-peralatan yang terpasang pada sistem tenaga listrik [2].

Gangguan yang umum terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik adalah hubung singkat [3]. Untuk mengurangi dampak dan mengamankan peralatan yang disebabkan oleh hubung singkat dengan cepat, diperlukan proses koordinasi yang baik pada sistem proteksi. Peralatan proteksi yang digunakan di penyulang diantaranya *Over Current Relay* (OCR), *Ground Fault Relay* (GFR), dan *recloser* [4]. Dengan pengaturan yang tepat, peralatan sistem proteksi pada penyulang bisa bekerja dengan baik apabila terjadi gangguan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Analisis dan Perhitungan Arus Hubung Singkat

Analisis dan perhitungan arus hubung singkat (*short circuit*) dilakukan untuk menentukan besarnya arus hubung singkat yang timbul pada suatu jaringan sehingga dapat menentukan rating ketahanan peralatan yang terpasang pada sistem. Selain itu, analisis hubung singkat dilakukan untuk mengidentifikasi potensi masalah pada suatu sistem sehingga membantu dalam perencanaan serta pengaturan koordinasi proteksi.

Metode yang digunakan dalam perhitungan arus hubung singkat salah satunya dengan menggunakan metode impedansi [5][6].

Menghitung Impedansi

1. Menghitung impedansi sumber (X_s) pada bus 150 KV menggunakan persamaan 1 sebagai berikut [7][8].

$$X_s = \frac{kV^2}{MVA} \quad (1)$$

Untuk mengkonversi impedansi yang terletak pada sisi 150 KV ke sisi 20 KV menggunakan persamaan 2 [7][8].

$$X_s (\text{sisi } 20 \text{ kV}) = \frac{20^2}{150^2} \times X_s (\text{sisi } 150 \text{ kV}) \quad (2)$$

2. Menghitung impedansi transformator yaitu dengan menggunakan persamaan 3 [7][8].

$$X_t (\text{pada } 100\%) = \frac{kV^2}{MVA} \quad (3)$$

Setelah itu mencari nilai reaktansi positif dan negatif ($X_{t1}=X_{t2}$) menggunakan persamaan 4 [7][8].

$$X_t = \% \text{ yang diketahui } \times X_t (\text{pada } 100\%) \quad (4)$$

3. Menghitung impedansi penyulang dengan menggunakan persamaan 5 untuk urutan positif dan negatif serta persamaan untuk impedansi 6 urutan nol [7][8].

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang } \times \text{ panjang penyulang (km)} \times Z_1/Z_2 \quad (5)$$

$$Z_0 = \% \text{ panjang } \times \text{ panjang penyulang (km)} \times Z_0 \quad (6)$$

Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat (*Short Circuit*)

Untuk mencari gangguan satu fasa ke tanah dapat menggunakan persamaan 7 [9].

$$I_{1 \text{ fasa}} = \frac{3 \cdot V_{ph}}{Z_{0eq} + Z_{1eq} + Z_{2eq}} \quad (7)$$

Dimana:

$I_{1 \text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat satu fasa

V_{ph} = Tegangan fasa-netral sistem 20 kV.

Z_{1eq} = Impedansi ekuivalen urutan positif.

Z_{0eq} = Impedansi ekuivalen urutan nol.

Untuk mencari gangguan hubung singkat dua fasa dapat menggunakan persamaan 8 [9].

$$I_{2 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph-ph}}{2Z_{1eq}} \quad (8)$$

Dimana:

$I_{2 \text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat 2 fasa (A).

V_{ph-ph} = Tegangan fasa-fasa sistem 20 kV

Z_{1eq} = Impedansi ekuivalen urutan positif (ohm).

Untuk mencari gangguan hubung singkat tiga fasa dapat menggunakan persamaan 9 [9][10].

$$I_{3 \text{ fasa}} = \frac{V_{ph}}{Z_{1eq}} \quad (9)$$

Dimana:

$I_{3 \text{ fasa}}$ = Arus gangguan hubung singkat 3 fasa (A)

V_{ph} = Tegangan fasa-netral sistem 20 kV

Z_{1eq} = Impedansi ekuivalen urutan positif (ohm).

B. Over Current Relay (OCR)

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. Pada proteksi jaringan distribusi, OCR ini merupakan

pengaman utama [7]. Untuk perhitungan waktu kerja OCR berdasarkan bentuk kurvanya dapat dilihat pada persamaan 10 sampai persamaan 13 [11] [12].

1. *Standard inverse*

$$t = \left[\frac{0.14}{I^{0.02-1}} \right] tms \quad (10)$$

2. *Very inverse*

$$t = \left[\frac{13.5}{I^{-1}} \right] tms \quad (11)$$

3. *Extremely inverse*

$$t = \left[\frac{80}{I^{2-1}} \right] tms \quad (12)$$

4. *Long time inverse*

$$t = \left[\frac{120}{I^{-1}} \right] tms \quad (13)$$

Dimana:

t = waktu kerja relai

tms = time multiple setting

C. Ground Fault Relay (GFR)

Relai hubung tanah atau *Ground Fault Relay (GFR)* berfungsi untuk memproteksi SUTM/SKTM dari gangguan tanah. GFR (*ground fault relay*) maupun OCR (*Over Current Relay*) merupakan pengaman utama atau *main protection* pada jaringan distribusi tegangan menengah [13].

D. Recloser

Recloser adalah rangkaian listrik yang terdiri pemutus tenaga yang dilengkapi kotak control elektronik (*Electronic Control Box recloser*), yaitu suatu peralatan elektronik sebagai kelengkapan *recloser* dimana peralatan ini tidak berhubungan dengan tegangan menengah dan pada peralatan ini, *recloser* dapat dikendalikan cara pelepasannya. Dari dalam kotak kontrol inilah pengaturan (*setting*) *recloser* dapat ditentukan. *Recloser* bekerja secara otomatis mengamankan suatu sistem dari arus lebih yang diakibatkan adanya gangguan hubung singkat.

E. Electrical Transient Analyzer Program (ETAP)

ETAP 12.6.0 (*Electrical Transient Analyzer Program*) merupakan sebuah perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi tenaga listrik. Simulasi yang dapat dijalankan ETAP dapat bekerja dalam keadaan *offline* untuk simulasi tenaga listrik, *online* untuk pengelolaan data *real-time* atau digunakan

untuk mengendalikan sistem secara *real-time*. Fitur yang disediakan oleh ETAP dapat digunakan untuk menganalisis pembangkitan tenaga listrik, sistem transmisi maupun sistem distribusi tenaga listrik [14].

III. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam studi ini adalah perhitungan dan simulasi. Perhitungan dilakukan untuk mengetahui arus hubung singkat 3 fasa, fasa ke fasa dan fasa ke tanah yang digunakan untuk setting OCR dan GFR penyulang serta recloser. Simulasi dilakukan menggunakan ETAP 12.6.0 untuk mengamati besar arus sebelum dan setelah terjadi gangguan serta waktu kerja OCR dan GFR penyulang serta recloser di penyulang Dieng-02.

Metode dalam melakukan perhitungan arus Hubung Singkat, dimulai dengan menghitung : Perhitungan Arus Nominal Transformator

$$In_{150kV} = \frac{MVA}{KV \cdot \sqrt{3}} \quad (14)$$

Perhitungan Reaktansi Sumber (Xs)

$$X_{S150kV} = \frac{KV(\text{sisi primer trafo})^2}{MVAH_s} \quad (15)$$

Perhitungan Reaktansi Transformator (Xt)

$$X_{t1} = \frac{KV^2}{MVA} \times Z_t \quad (16)$$

Perhitungan Impedansi Penyulang

Nilai impedansi yang dihitung adalah impedansi urutan positif, negatif menggunakan persamaan 17, dan urutan nol menggunakan persamaan 18. Setelah mendapat nilai impedansi, langkah selanjutnya mencari nilai impedansi ekuivalen menggunakan persamaan 19 dan 20 yang akan digunakan untuk mencari nilai arus hubung singkat.

$$Z_1 = Z_2 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang} \text{ penyulang (km)} \times Z_{kabel} \quad (17)$$

$$Z_0 = \% \text{ panjang} \times \text{panjang} \text{ penyulang (km)} \times Z_0 \quad (18)$$

$$Z_{1eq} = Z_1 + X_{S20kV} + X_{t1} \quad (19)$$

$$Z_{0eq} = Z_0 + X_{t0} \quad (20)$$

IV. PEMBAHASAN

A. Data Penelitian

Gardu Induk Dieng memiliki sebuah transformator tenaga dengan kapasitas 30 MVA. Transformator tenaga ini menghubungkan tiga buah penyulang yaitu penyulang Dieng-01, Dieng-02, dan Dieng-03 yang untuk memenuhi kebutuhan listrik daerah Dieng. Pada penelitian ini, penyulang yang diamati adalah penyulang Dieng-02.

Berikut adalah spesifikasi penyulang Dieng-02.

1. Trafo tenaga: Trafo I 30 MVA
2. Rating daya nyata hubung singkat sumber: 3180,4 MVA.
3. Rating tegangan: 150/20 kV.
4. Pola konfigurasi: Radial.
5. Sistem pentanahan: Kabel AAAC 240 mm² pada saluran utama dan kabel AAAC 70 mm² pada saluran cabang.
6. Panjang penyulang: 37,5 km.
7. Impedansi kabel urutan positif: $0,1344 + j0,3158$ ohm.
8. Impedansi kabel urutan nol: $0,3631 + j1,618$ ohm.

Gardu Induk Dieng memiliki satu buah transformator tenaga dengan spesifikasi terlihat pada Tabel-1. Sistem proteksi penyulang Dieng-02 terdiri dari sebuah PMT outgoing Tabel-2 dan tiga buah *recloser* (Tabel-3, Tabel-4, Tabel-5) dengan masing-masing memiliki *Over Current Relay* (OCR) untuk

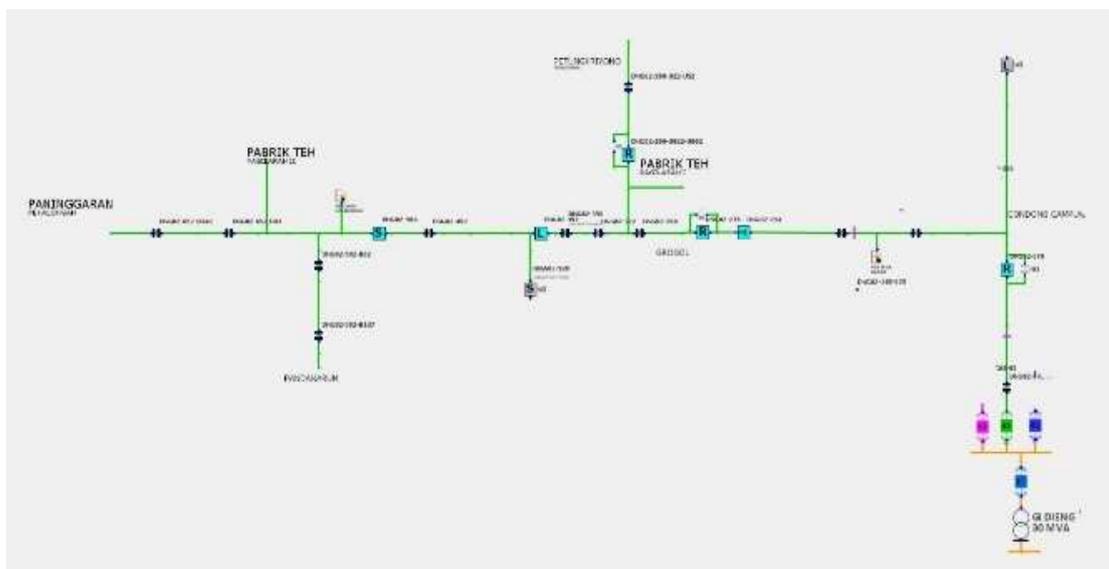
mengamankan dari arus lebih pada 3 fasa dan 2 fasa serta *Ground Fault Relay* untuk mengamankan arus lebih pada saluran 1 fasa ke tanah.

Tabel-1 Spesifikasi Transformator

Gardu Induk	Dieng
No Trafo	1
Merk	PASTI
No Seri	93P0012
Nom Teg	150/20
Frekuensi	50 Hz
Kapasitas	30 MVA
Impedansi	12,43%
Jenis Pendingin	ONAN/ONAF
Belitan Trafo	YNyn
Tahun Operasi	2002

Tabel-2 Spesifikasi PMT Outgoing

OCR		GFR	
Merk	GE	Merk	GE
Rasio CT	800/5	Rasio CT	800/5
$I > (A)$	480	$I > (A)$	160
Tms	0,20	Tms	0,30
Kurva	SI	Kurva	SI
$I \gg (A)$	2080	$I_o \gg (A)$	1560
$t \gg (s)$	0,30	$t_o \gg (\text{detik})$	0,30
$I \gg \gg (A)$	3880	$I_o \gg \gg (A)$	2600



Gambar-1 Single Line Diagram Penyulang Dieng-02.

Tabel-3 Spesifikasi *Recloser 1* (DNG02.70)

OCR		GFR	
Merk	NULEC	Merk	NULEC
Rasio CT	1000/1	Rasio CT	1000/1
I > (A)	430	I > (A)	140
Tms	0,12	Tms	0,12
Kurva	SI	Kurva	SI
I >> (A)	1505	Io >> (A)	896
I >>> (A)	2000	Io >>> (A)	2000

B. Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan Arus Nominal Transformator

Perhitungan arus nominal transformator dilakukan pada sisi *incoming* 150 KV dan sisi *outgoing* 20 KV. Nilai kapasitas transformator yang digunakan sesuai dengan spesifikasi transformator yang digunakan yaitu sebesar 30 MVA atau setara dengan 30.000 VA.

1. Arus nominal transformator pada sisi 150 KV

$$I_{n150kV} = \frac{MVA}{KV \cdot \sqrt{3}} = \frac{30000}{150 \cdot \sqrt{3}} = 150,470 \text{ Ampere}$$

2. Arus nominal transformator pada sisi 20 KV

$$I_{n20kV} = \frac{MVA}{KV \cdot \sqrt{3}} = \frac{30000}{20 \cdot \sqrt{3}} = 866,025 \text{ Ampere}$$

Perhitungan Reaktansi Sumber (Xs)

Nilai daya hubung singkat transformator (MVAHs) berdasarkan data dari PLN sebesar 3.180,4 MVA. Perhitungan untuk mencari reaktansi sumber sebagai berikut.

1. Reaktansi Sumber pada sisi 150 KV

$$X_{S150kV} = \frac{kV(\text{sisi primer trafo})^2}{MVAH_s} = \frac{150^2}{3180,4} = 7,074 \text{ Ohm}$$

2. Reaktansi Sumber pada sisi 20 KV

$$X_{S20kV} = \frac{kV(\text{sisi sekunder trafo})^2}{kV(\text{sisi primer trafo})^2} \times X_{S150kV} = \frac{20^2}{150^2} \times 7,074 = 0,126 \text{ Ohm}$$

Tabel-4 Spesifikasi *Recloser 2* (DNG02.215)

OCR		GFR	
Merk	NULEC	Merk	NULEC
Rasio CT	1000/1	Rasio CT	1000/1
I > (A)	250	I > (A)	120
Tms	0,10	Tms	0,10

Kurva	SI	Kurva	SI
I >> (A)	800	Io >> (A)	492
I >>> (A)	-	Io >>> (A)	-

Tabel-5 Spesifikasi *Recloser 2* (DNG02.290.U22.U002)

OCR		GFR	
Merk	ENTEC	Merk	ENTEC
Rasio CT	1000/1	Rasio CT	1000/1
I > (A)	250	I > (A)	110
Tms	0,10	Tms	0,08
Kurva	SI	Kurva	SI
I >> (A)	1000	Io >> (A)	800
I >>> (A)	1200	Io >>> (A)	1000

Perhitungan Reaktansi Transformator (Xt)

Nilai impedansi transformator (Zt) berdasarkan data yang diperoleh dari PLN adalah 12,43%.

1. Reaktansi transformator urutan positif dan negatif

$$X_{t1} = X_{t2}$$

$$X_{t1} = \frac{kV^2}{MVA} \times Z_t = \frac{20^2}{30} \times 0,1243$$

$$= 1,657 \text{ Ohm}$$

2. Reaktansi transformator urutan nol

Nilai reaktansi transformator urutan nol nilainya sama dengan reaktansi urutan positif/negatif untuk transformator delta tipe ynyn.

$$X_{t0} = X_{t1} = 1,657 \text{ Ohm}$$

Perhitungan Impedansi Penyulang

Nilai impedansi dihitung berdasarkan pada masing-masing zona proteksi. Pada penelitian ini, perhitungan nilai impedansi dilakukan pada titik 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100% dari panjang keseluruhan zona proteksi. Nilai impedansi yang dihitung adalah impedansi urutan positif, negatif menggunakan persamaan 17, dan urutan nol menggunakan persamaan 18. Setelah mendapat nilai impedansi, langkah selanjutnya mencari nilai impedansi ekuivalen menggunakan persamaan 19 dan 20 yang akan digunakan untuk mencari nilai arus hubung singkat.

Panjang zona proteksi PMT *Outgoing* adalah 0,1 km, *recloser 1* (DNG02.070) sebesar 3,7 km, *recloser 2* (DNG02.290.U022.U002) sebesar 17,4

km, dan recloser 3 (DNG02.215) sebesar 23 km. Hasil perhitungan impedansi ekuivalen pada setiap zona proteksi dapat dilihat pada Tabel-6.

Tabel-6 Impedansi Ekuivalen

Zona Proteksi		Impedansi Ekuivalen	
		Z _{1eq}	Z _{0eq}
PMT Outgoing (DNG.02)	20%	1,78	1,69
	40%	1,78	1,72
	60%	1,78	1,75
	80%	1,78	1,79
	100%	1,78	1,78
Recloser 1 (DNG.02.075)	20%	2,02	2,87
	40%	2,26	4,09
	60%	2,50	5,31
	80%	2,75	6,54
	100%	2,99	7,76
Recloser 2 (DNG.02.290.U022.U002)	20%	2,92	7,40
	40%	4,09	13,16
	60%	5,27	18,93
	80%	6,46	24,70
	100%	7,65	30,47
Recloser 3 (DNG.02.215)	20%	3,29	9,25
	40%	4,85	16,88
	60%	6,42	24,5
	80%	7,99	32,13
	100%	9,56	39,76

Perhitungan Arus Hubung Singkat

Perhitungan arus hubung singkat terdiri dari arus hubung singkat tiga fasa, dua fasa, dan satu fasa. Untuk perhitungan arus hubung singkat 1 fasa dapat menggunakan persamaan 7, arus hubung singkat 2 fasa menggunakan persamaan 8, dan 3 fasa menggunakan persamaan 9. Untuk nilai impedansi menggunakan nilai yang ada pada Tabel 6. Hasil perhitungan arus hubung singkat setiap zona tertera pada Tabel-7, Tabel-8, Tabel-9 dan Tabel-10.

Tabel-7 Arus Hubung Singkat PMT Outgoing

Jarak (%)	PMT Outgoing DNG.02		
	3 fasa (A)	2 fasa (A)	1 fasa (A)
20	6494,772	5617,978	6606,111
40	6494,772	5617,978	6568,576
60	6494,772	5617,978	6531,465
80	6494,772	5617,978	6482,632
100	6494,772	5617,978	6446,483

Nilai-nilai yang digunakan pada setiap komponen rangkaian simulasi disesuaikan dengan data yang diperoleh dari PT. PLN (Persero) UP3 Purwokerto. Hasil simulasi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan manual. Perbandingan ini

bertujuan untuk menentukan persentase kesalahan dari simulasi dengan hasil perhitungan yang telah dilakukan.

Tabel-8 Arus Hubung Singkat Recloser 1

Jarak (%)	Recloser DNG.02.075		
	3 fasa (A)	2 fasa (A)	1 fasa (A)
20	5723,116	4950,495	5019,114
40	5115,351	4424,779	4028,116
60	4624,277	4000,000	3363,926
80	4203,889	3636,364	2880,572
100	3866,453	3344,482	2524,169

Tabel-9 Arus Hubung Singkat Recloser 2

Jarak (%)	Recloser DNG. 02.290.U022.U002		
	3 fasa (A)	2 fasa (A)	1 fasa (A)
20	3959,142	3424,658	2619,493
40	2826,575	2444,988	1625,215
60	2193,680	1897,533	1176,861
80	1789,581	1547,988	921,905
100	1511,202	1307,190	757,747

Tabel-11, Tabel-12, Tabel-13 dan Tabel -14 menampilkan hasil perbandingan arus hubung singkat dengan asumsi gangguan berada di titik 100% dari total panjang zona proteksi.

Tabel 10 Arus Hubung Singkat Recloser 3

Jarak (%)	Recloser DNG.02.215		
	3 fasa (A)	2 fasa (A)	1 fasa (A)
20	3513,889	3039,514	2166,276
40	2383,648	2061,856	1296,042
60	1800,731	1557,632	924,856
80	1446,895	1251,564	718,502
100	1209,278	1046,025	589,030

C. Simulasi Arus Hubung Singkat

Simulasi Arus hubung singkat menggunakan software ETAP 12.6.0, seperti tampak pada Gambar-2 berikut.

Tabel-11 Perbandingan Simulasi dan Perhitungan PMT

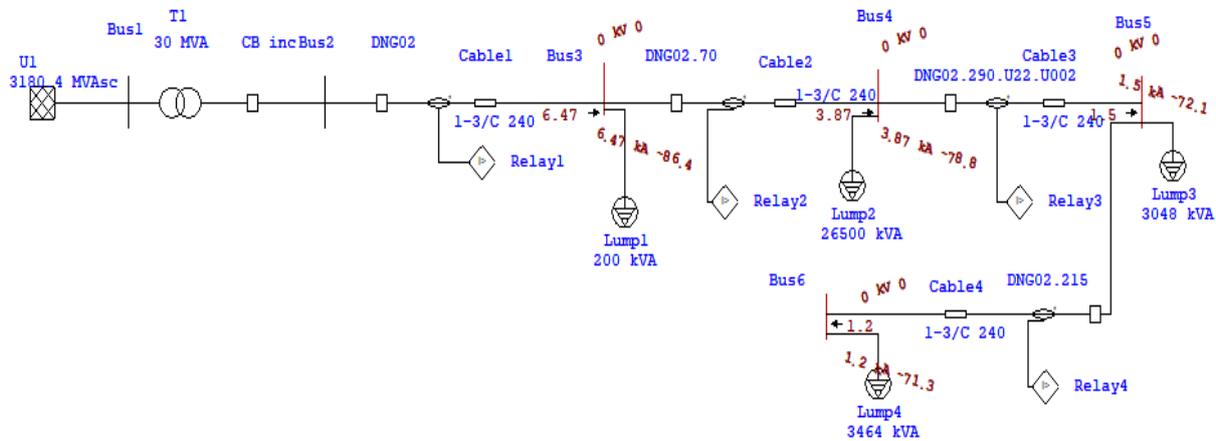
Arus Hubung Singkat	Perbandingan		
	Perhitungan	Simulasi	% Kesalahan
Tiga Fasa (A)	6494,772	6470	0,381%
Dua Fasa (A)	5617,978	5510	1,922%
Satu Fasa (A)	6446,483	6362	1,311%

Tabel-12 Perbandingan Simulasi dan Perhitungan
Recloser 1

Arus Hubung Singkat	Perbandingan		
	Perhitungan	Simulasi	% Kesalahan
Tiga Fasa (A)	3866,453	3870	0,092%
Dua Fasa (A)	3344,482	3340	0,134%
Satu Fasa (A)	2524,482	2520	0,178%

Tabel-13 Perbandingan Simulasi dan Perhitungan
Recloser 2

Arus Hubung Singkat	Perbandingan		
	Perhitungan	Simulasi	% Kesalahan
Tiga Fasa (A)	1511,202	1500	0,741%
Dua Fasa (A)	1307,190	1308	0,091%
Satu Fasa (A)	757,747	758	0,033%



Gambar-2 Hasil Simulasi Arus Hubung Singkat.

D. Perhitungan Waktu Kerja Relai

Untuk melakukan perhitungan waktu kerja *Over Current Relay* (OCR) dan *Ground Fault Relay* (GFR), data yang diperlukan adalah nilai *time multiple setting* (tms), nilai arus pengaturan (Iset) dari OCR, serta nilai arus hubung singkat (Ihs) pada zona proteksi. Karena OCR dan GFR memakai kurva karakteristik standar inverse, perhitungan waktu kerja OCR dan GFR dapat menggunakan persamaan 18.

$$Tk = tms \times \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1} \tag{18}$$

Tabel-14 berikut adalah perhitungan waktu kerja (Tk) OCR dan GFR dengan asumsi gangguan terjadi pada jarak 100% dari masing-masing zona gangguan.

Tabel-14 Perbandingan Simulasi dan Perhitungan
Recloser 3

Arus Hubung Singkat	Perbandingan		
	Perhitungan	Simulasi	% Kesalahan
Tiga Fasa (A)	1209,278	1200	0,767%
Dua Fasa (A)	1046,025	1046	0,002%
Satu Fasa (A)	587,235	589	0,301%

Zona Proteksi PMT Outgoing DNG.02

Berdasarkan data yang diperoleh dari PLN, nilai tms OCR zona proteksi PMT *outgoing* bernilai 0,2.

Sedangkan, nilai Iset OCR adalah 480. Berikut adalah perhitungan waktu kerja OCR 3 fasa.

$$Tk = tms \times \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,2x \frac{0,14}{\left(\frac{6494,772}{480}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,524 \text{ detik}$$

Untuk perhitungan waktu kerja OCR 2 fasa adalah sebagai berikut.

$$Tk = tms x \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,2 x \frac{0,14}{\left(\frac{5617,978}{480}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,555 \text{ detik}$$

Nilai tms GFR zona proteksi PMT *outgoing* bernilai 0,3. Sedangkan, nilai Iset GFR adalah 160. Berikut adalah perhitungan waktu kerja GFR untuk arus 1 fasa.

$$Tk = tms x \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,3 x \frac{0,14}{\left(\frac{6446,483}{160}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,547 \text{ detik}$$

Zona Proteksi Recloser 1

Berdasarkan data yang diperoleh dari PLN, nilai tms OCR zona proteksi *Recloser 1* bernilai 0,12. Sedangkan, nilai Iset OCR adalah 250. Berikut adalah perhitungan waktu kerja OCR 3 fasa.

$$Tk = tms x \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,12 x \frac{0,14}{\left(\frac{3866,453}{250}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,374 \text{ detik}$$

Untuk perhitungan waktu kerja OCR 2 fasa adalah sebagai berikut.

$$Tk = tms x \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,12 x \frac{0,14}{\left(\frac{3344,482}{250}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,401 \text{ detik}$$

Nilai tms GFR zona proteksi *Recloser 1* bernilai 0,12. Sedangkan, nilai Iset GFR adalah 140. Berikut

adalah perhitungan waktu kerja GFR untuk arus 1 fasa.

$$Tk = tms x \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,12 x \frac{0,14}{\left(\frac{2524,169}{140}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,282 \text{ detik}$$

Zona Proteksi Recloser 2

Berdasarkan data yang diperoleh dari PLN, nilai tms OCR zona proteksi *Recloser 2* bernilai 0,1. Sedangkan, nilai Iset OCR adalah 250. Berikut adalah perhitungan waktu kerja OCR 3 fasa.

$$Tk = tms x \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,1 x \frac{0,14}{\left(\frac{1511,202}{250}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,382 \text{ detik}$$

Untuk perhitungan waktu kerja OCR 2 fasa adalah sebagai berikut.

$$Tk = tms x \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,1 x \frac{0,14}{\left(\frac{1307,190}{250}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,416 \text{ detik}$$

Nilai tms GFR zona proteksi *Recloser 2* bernilai 0,1. Sedangkan, nilai Iset GFR adalah 110. Berikut adalah perhitungan waktu kerja GFR untuk arus 1 fasa.

$$Tk = tms x \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,1 x \frac{0,14}{\left(\frac{757,747}{110}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,356 \text{ detik}$$

Zona Proteksi Recloser 3

Berdasarkan data yang diperoleh dari PLN, nilai tms OCR zona proteksi *Recloser 3* bernilai 0,1. Sedangkan, nilai Iset OCR adalah 250. Berikut adalah perhitungan waktu kerja OCR 3 fasa.

$$Tk = tms \times \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,1 \times \frac{0,14}{\left(\frac{1209,278}{250}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,437 \text{ detik}$$

Untuk perhitungan waktu kerja OCR 2 fasa adalah sebagai berikut.

$$Tk = tms \times \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,1 \times \frac{0,14}{\left(\frac{1046,025}{250}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,482 \text{ detik}$$

Nilai tms GFR zona proteksi *Recloser* 3 bernilai 0,1. Sedangkan, nilai Iset GFR adalah 120. Berikut adalah perhitungan waktu kerja GFR untuk arus 1 fasa.

$$Tk = tms \times \frac{0,14}{\left(\frac{Ihs}{Iset}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,1 \times \frac{0,14}{\left(\frac{589,030}{120}\right)^{0,02} - 1}$$

$$Tk = 0,433 \text{ detik}$$

Tabel-15 Setting OCR

Setting	Iset	Isc (3 Fasa)	Isc (2 Fasa)	Tk (1 Fasa)	Tk (2 Fasa)
PMT Outgoing (DNG.02)	480	6494,772	5617,978	0,7	0,7
Recloser 1 (DNG.02.075)	250	3866,453	3344,482	0,3	0,3
Recloser 2 (DNG.02.290.U022.U02)	250	1511,202	1307,190	0,3	0,3
Recloser 3 (DNG.02.215)	250	1209,278	1046,025	0,3	0,3

Analisis Koordinasi Relai Proteksi

Setelah mendapatkan waktu kerja, dapat dilihat bahwa baik pada OCR maupun GFR *Recloser* 1 lebih cepat mendahului *Recloser* 2 dan *Recloser* 3. Seharusnya, *Recloser* 3 bekerja lebih cepat lalu disusul dengan kerja *Recloser* 2, *Recloser* 1, dan terakhir PMT *Outgoing*.

E. Pengaturan Ulang Waktu Kerja Relai

Untuk memperbaiki waktu kerja peralatan proteksi, diperlukan pengaturan ulang pada peralatan proteksi. Untuk mendapatkan jeda waktu selama 0,4 detik diperlukan waktu kerja pada PMT *Incoming* yang terhubung selama 1,1 detik sehingga untuk waktu kerja PMT *Outgoing* adalah selama 0,7 detik [7][8].

Waktu kerja *Recloser* 1 akan di-setting sebesar 0,3 detik untuk mendapatkan jeda waktu antara PMT *Outgoing* dengan *Recloser* 1 sebesar 0,4 detik sesuai dengan standar PLN. Untuk waktu kerja *recloser* 2 dan *recloser* 3 masing-masing akan di-setting sebesar 0,3 detik.

Pengaturan Ulang Nilai TMS OCR

Nilai *setting* yang diperlukan untuk mencari nilai TMS OCR pada PMT *outgoing* dan *recloser* dapat dilihat pada Tabel 15.

Perhitungan untuk mencari nilai TMS OCR yang baru dengan menggunakan asumsi jarak 100% (Ihs 100%) dari zona proteksi :

Nilai TMS OCR 3 Fasa

Untuk melakukan pengaturan ulang, diperlukan nilai Tms baru pada OCR dan GFR sehingga didapatkan nilai waktu kerja baru yang sesuai. Untuk mencari nilai tms yang baru dapat menggunakan persamaan 21

$$Tms = Tk \times \frac{\left(\frac{Ifault}{Iset}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \tag{21}$$

$$Tms_{PMT \text{ Outgoing}} = 0,7 \times \frac{(6494,772/480)^{0,02} - 1}{0,14}$$

$$= 0,267 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser1} = 0,3 \times \frac{(3886,453/250)^{0,02} - 1}{0,14}$$

$$= 0,121 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser2} = 0,3 \times \frac{(1511,202/250)^{0,02} - 1}{0,14}$$

$$= 0,078 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser3} = 0,1 \times \frac{(1209,278/250)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,069 \text{ detik}$$

Nilai TMS OCR 2 Fasa

$$Tms_{PMT \text{ Outgoing}} = 0,7 \times \frac{(5617,978/480)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,252 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser1} = 0,3 \times \frac{(3344,482/250)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,114 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser2} = 0,3 \times \frac{(1307,190/250)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,072 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser3} = 0,3 \times \frac{(1046,025/250)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,062 \text{ detik}$$

Pengaturan Ulang Nilai TMS GFR

Nilai *setting* yang diperlukan untuk mencari nilai TMS GFR pada PMT *outgoing* dan *recloser* dapat dilihat pada Tabel-16.

Perhitungan untuk mencari nilai TMS GFR yang baru dengan menggunakan asumsi jarak 100% (Isc 100%) dari zona proteksi :

$$Tms_{PMT \text{ Outgoing}} = 0,7 \times \frac{(6446,483/160)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,384 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser1} = 0,3 \times \frac{(2524,169/140)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,128 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser2} = 0,3 \times \frac{(757,747/110)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,084 \text{ detik}$$

$$Tms_{Recloser3} = 0,3 \times \frac{(589,030/120)^{0,02-1}}{0,14}$$

$$= 0,069 \text{ detik}$$

Setting OCR dan GFR Baru

Tabel 17 menampilkan *setting* OCR 3 Fasa yang baru, Tabel-18 untuk OCR 2 fasa dan Tabel-19 menampilkan *setting* GFR yang baru.

Tabel-16 *Setting* GFR

Setting	Iset	Isc (1 Fasa)	Tk
PMT Outgoing (DNG.02)	160	6446,483	0,7
Recloser 1 (DNG.02.075)	140	2524,169	0,3
Recloser 2 (DNG.02.290.U022.U002)	110	757,747	0,3
Recloser 3 (DNG.02.215)	120	589,030	0,3

Tabel-17 *Setting* OCR 3 Fasa Baru

Setting	Iset	Tms	Tk
PMT Outgoing DNG.02	480	0,267	0,7
Recloser 1 (DNG.02.075)	250	0,121	0,3
Recloser 2 (DNG.02.290.U022.U002)	250	0,078	0,3
Recloser 3 (DNG.02.215)	250	0,069	0,3

Namun, karena arus hubung singkat yang besar, *Recloser* DNG02.215 tidak dapat mengatasi gangguan tersebut. Saat *Recloser* DNG02.215 tidak dapat menangani gangguan, relai yang paling dekat dari *Recloser* DNG02.215 yaitu *Recloser* DNG.02.290.U022.U002 akan bekerja.

Jika gangguan masih tidak dapat ditangani, maka *Recloser* DNG02.070 akan bekerja. Dan jika seluruh *Recloser* tidak dapat menangani arus hubung singkat, maka PMT *Outgoing* (DNG02) akan mengalami trip.

Dari Tabel perbandingan di atas hasil perhitungan dengan hasil simulasi, dapat terlihat waktu kerja hasil simulasi tidak jauh berbeda dengan hasil perhitungan manual yang didapat.

Tabel-18 *Setting* OCR 2 Fasa Baru

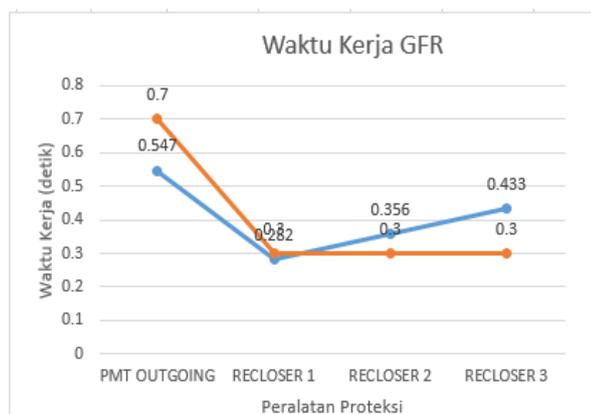
Setting	Iset	Tms	Tk
PMT Outgoing DNG.02	480	0,252	0,7
Recloser 1 (DNG.02.075)	250	0,114	0,3
Recloser 2 (DNG.02.290.U022.U002)	250	0,072	0,3
Recloser 3 (DNG.02.215)	250	0,062	0,3

Tabel-19 Setting GFR Baru

Setting	Iset	Tms	Tk
PMT Outgoing DNG.02	160	0,384	0,7
Recloser 1 (DNG.02.075)	140	0,128	0,3
Recloser 2 (DNG.02.290.U022.U002)	110	0,084	0,3
Recloser 3 (DNG.02.215)	120	0,069	0,3

F. Simulasi Koordinasi Sistem Proteksi

Simulasi dilakukan dengan mengasumsikan gangguan terletak pada bus yang terletak paling jauh. Saat adanya arus hubung singkat, relai yang pertama kali bekerja adalah relai yang paling dekat yaitu Recloser DNG02.215.



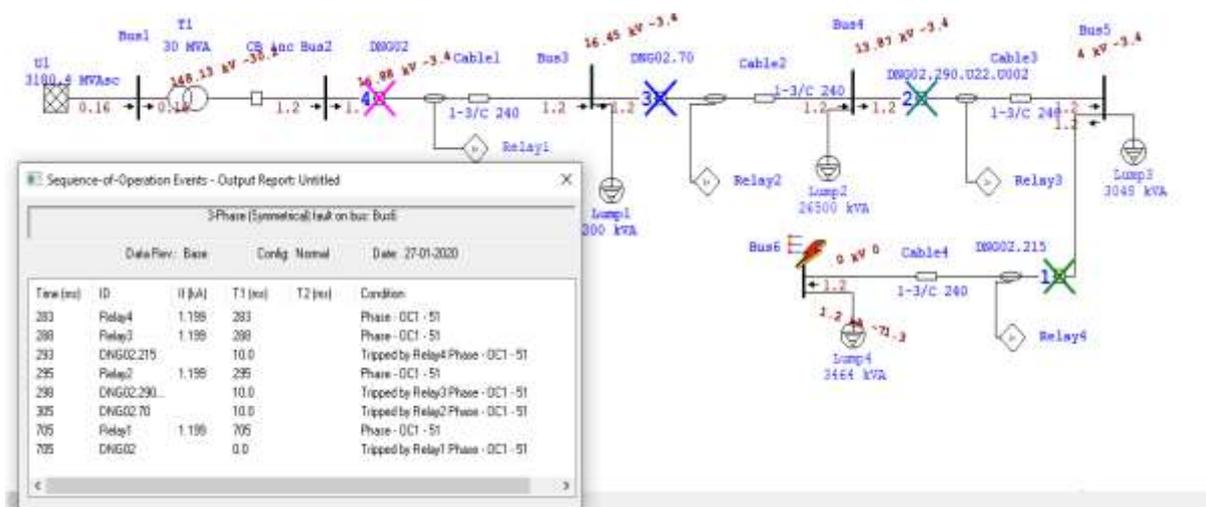
Gambar-3 Kurva perbandingan waktu kerja GFR

Gambar-3 menunjukkan waktu kerja GFR lama (warna biru) dimana *Recloser* 3 bekerja lebih lambat dibandingkan *Recloser* 1. Sedangkan nilai tms baru (warna merah) menunjukkan *Recloser* 1, 2 dan 3 waktu kerjanya bersamaan. Hal ini diperoleh dari pengubahan waktu kerja PMT *Outgoing* menjadi 0,7 detik dan *Recloser* 1, *Recloser* 2 , dan *Recloser* 3 menjadi 0,3 detik sehingga koordinasi kerja system proteksinya berjalan.

Simulasi dilakukan dengan mengasumsikan gangguan terletak pada bus yang terletak paling jauh Gambar-4. Saat adanya arus hubung singkat, relai yang pertama kali bekerja adalah relai yang paling dekat yaitu *Recloser* DNG02.215. Jika arus hubung singkatnya terlalu besar, *Recloser* DNG02.215 tidak dapat mengatasi gangguan tersebut. Saat *Recloser* DNG02.215 tidak dapat menangani gangguan, relai yang paling dekat dari *Recloser* DNG02.215 yaitu *Recloser* DNG.02.290.U022.U002 akan bekerja. Jika gangguan masih tidak dapat ditangani, maka *Recloser* DNG02.070 akan bekerja. Dan jika seluruh *Recloser* tidak dapat menangani arus hubung singkat, maka PMT *Outgoing* (DNG02) akan mengalami trip.

Tabel 20 Perbandingan Perhitungan dan Simulasi

Peralatan Proteksi	Perbandingan Waktu Kerja (Tk)		
	Perhitungan (ms)	Simulasi (ms)	% Kesalahan
PMT Outgoing DNG.02	700	705	0,714%
Recloser 1 (DNG.02.070)	300	305	1,667%
Recloser 2 (DNG.02.290.U022.U002)	300	298	0,667%
Recloser 3 (DNG.02.215)	300	293	2,333%



Gambar-4 Hasil Simulasi Koordinasi Relai.

V. PENUTUP

A. Kesimpulan

1. Penyulang Dieng-02 terdiri dari 4 zona proteksi dengan sebuah PMT *outgoing* dan 3 buah *recloser*. Saat terjadi gangguan, *recloser* akan bekerja lebih dahulu, sedangkan PMT *outgoing* bekerja sebagai *backup* saat seluruh *recloser* tidak dapat mengatasi gangguan.
2. Nilai tms baru diperoleh dari perubahan waktu kerja PMT *Outgoing* menjadi 0,7 detik dan *Recloser* 1, *Recloser* 2, dan *Recloser* 3 menjadi 0,3 detik.
3. Perubahan waktu kerja diperlukan untuk menghasilkan Δt pada PMT dan *Recloser* 1 sebesar 0,4 detik dan waktu kerja seluruh *recloser* sebesar 0,3 detik agar sesuai dengan standar PLN

B. Saran

1. Berdasarkan data dari PT PLN (Persero) UP3 Purwokerto, penyulang Dieng-02 banyak mengalami *trip* pada 5 tahun terakhir, sehingga perlu perawatan dan pengecekan secara berkala.
2. Untuk penelitian selanjutnya, dapat menganalisa di penyulang yang lain.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Setiawan J., "Rekonfigurasi Jaringan Distribusi Distribusi 20KV Gardu Induk Kalibakal Menggunakan Metode Binary Particle Swarm Optimization," Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto 2018.
- [2] N. S. Wulandari, "Koordinasi Rele Arus Lebih Dengan Sisi 150 KV Pada Interbus Transformator 150KV/70KV Di Gardu Induk Keramasan," Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, 2014.
- [3] D. Suswanto, Sistem Distribusi Tenaga Listrik Untuk Mahasiswa Teknik Elektro. Padang: Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, 2009.
- [4] A. Mardensyah, "Studi Perencanaan Koordinasi Rele Proteksi Pada Saluran Udara Tegangan Tinggi Gardu Induk Gambir Lama-Pulomas," Universitas Indonesia, Jakarta, 2008.
- [5] D. Marsudi, Operasi Sistem Tenaga Listrik, 1st ed. Yogyakarta: Penerbit Graha Ilmu, 2006.
- [6] M. P. Lesnando and R. P. Ardiani, Modul Pelatihan ETAP. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada, 2013.
- [7] PT PLN (Persero), "SPLN 52-3:1983 Pola Pengamanan Sistem." 1983.
- [8] IEC 60255, "Overcurrent Protection for Phase for Phase and Earth Faults."
- [9] Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 1965 Tentang Pembubaran Badan Pimpinan Umum Perusahaan Listrik Negara dan Pendirian Perusahaan Listrik Negara (P.L.N.) dan Perusahaan Gas Negara (P.G.N.). Presiden Republik Indonesia.
- [10] M. A Farahat dan B. M. Al-Shamari, "Power System Reliability Evaluation And Quality Assessment By Fuzzy Logic Technique," 39th Int. Univ. Power Eng. Conf., hlm. 478, Sep 2004.
- [11] K. Muhammar, "Perencanaan Sistem Distribusi Tenaga Listrik," Univ. Mercu Buana, 2011.

- [12]P. S. Hibatullah, “Analisis Koordinasi Over Current Relay, Ground Fault Relay dan Recloser Akibat Gangguan Hubung Singkat Pada Penyulang Kalibakal-12 (KBL-12) PT PLN (Persero) Gardu Induk Kalibakal Purwokerto,” Universitas Jenderal Soedirman, Purwokerto, 2018.
- [13]I. G. P. Arka, N. Mudiana, dan G. K. Abasana, “Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Penyulang 20 kv Dengan Over Current Relay (OCR) Dan Ground Fault Relay (GFR),” *J. Log.*, 2016; 16(1).
- [14]J. F. Bario, “Analisis Perencanaan Koordinasi Sistem Proteksi Relay Arus Lebih Pada Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Di Pusdiklat Migas Cepu,” Universitas Muhammadiyah Surakarta, Solo, 2016.
- [15]A. Syafi’i, “Analisa Koordinasi Recloser dan OCR (Over current relay) Untuk Gangguan Hubung Singkat Pada Penyulang 3 Distribusi 20 KV GI Jajar,” Universitas Muhammadiyah Surakarta, Solo, 2016.
- [16]W. D. Stevenson, Analisis Sistem Tenaga Listrik. New York: McGraw-Hill, 1984.
- [17]Zuhail, Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 2000.

