

Studi Kinerja Sistem Proteksi Arus Lebih pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah 20 kV Penyulang Nginden PT. PLN UP3 Surabaya Selatan

¹Ilham Daffa Firdaus Al Bukhori, ²Aris Heri Andriawan, ³Reza Sarwo Widagdo

^{1,2,3}Program Studi Teknik Elektro, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Indonesia

¹ilham.daffa263@gmail.com, ²aris_po@untag-sby.ac.id, ³rezaswidagdo@untag-sby.ac.id

Abstract - The electrical power distribution system is vulnerable to short-circuit faults, which can potentially cause equipment damage and disrupt supply continuity. This study aims to evaluate the performance of the overcurrent protection system (Overcurrent Relay/OCR) on the 20 kV Nginden Feeder at PT PLN UP3 South Surabaya. The analysis shows that fault current decreases as the distance from the substation to the fault location increases. Three-phase faults produce the highest current, reaching 17,021.27 A at 10% of the feeder length and decreasing to 5,137.42 A at the end of the feeder (100%). For two-phase faults, the current ranges from 8,510.63 A to 2,568.71 A, while single-phase-to-ground faults range from 5,655.67 A to 1,517.61 A. The OCR setting is determined based on a load current of 480 A, a CT ratio of 1000/5, and a safety factor of 1.2, resulting in a setting current of 576 A and a Time Multiplier Setting (TMS) of 0.150 seconds. Test results indicate that the relay operating time varies depending on the fault type and location: three-phase faults are detected the fastest, within 0.299 – 0.469 s; two-phase faults within 0.379 – 0.691 s; and single-phase-to-ground faults take the longest, between 0.449 – 1.073 s. This configuration meets the criteria of reliability, selectivity, sensitivity, and operating speed, making it relevant for optimizing the protection system performance in 20 kV distribution networks.

Keywords —Short Circuit Fault; Nginden Feeder; OCR Relay

Abstrak - Sistem distribusi 20 kV memiliki kerentanan terhadap gangguan yang disebabkan karena arus hubung singkat sehingga berpotensi menimbulkan kerusakan peralatan serta mengganggu kontinuitas pasokan energi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem proteksi arus lebih (OCR) pada Penyulang Nginden 20 kV di PT PLN UP3 Surabaya Selatan. Analisis menunjukkan bahwa nilai arus gangguan menurun seiring bertambahnya jarak titik gangguan dari gardu induk. Gangguan tiga fasa menghasilkan arus tertinggi, yakni 17.021,27 A pada posisi 10% panjang penyulang, dan menurun hingga 5.137,42 A di ujung penyulang (100%). Untuk gangguan dua fasa, arus berkisar dari 8.510,63 A hingga 2.568,71 A, sedangkan gangguan satu fasa ke tanah berada pada rentang 5.655,67 A hingga 1.517,61 A. Penentuan setting OCR mengacu pada arus beban 480 A, dengan rasio CT 1000/5 dan faktor keamanan 1,2, sehingga diperoleh arus setting 576 A serta Time Multiplier Setting (TMS) sebesar 0,150 detik. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa waktu kerja relay bervariasi sesuai jenis dan lokasi gangguan: gangguan tiga fasa terdeteksi paling cepat, yakni 0,299–0,469 detik; gangguan dua fasa berada pada kisaran 0,379–0,691 detik; sedangkan gangguan satu fasa ke tanah memiliki waktu deteksi terlama, yaitu 0,449–1,073 detik. Konfigurasi setting ini memenuhi kriteria keandalan, selektivitas, sensitivitas, dan kecepatan operasi, sehingga dapat mendukung optimalisasi kinerja sistem proteksi pada jaringan distribusi 20 kV.

Kata Kunci—Gangguan Hubung Singkat; Penyulang Nginden; Relay OCR

I. PENDAHULUAN

Permintaan energi listrik terus menunjukkan tren peningkatan seiring dengan peningkatan beban, kemajuan sektor industri, serta perluasan aktivitas ekonomi. Kondisi tersebut menuntut infrastruktur ketenagalistrikan yang andal guna menjamin kontinuitas dan keamanan pasokan energi. Dalam rantai penyaluran tenaga listrik, sistem distribusi

memegang peranan vital karena berfungsi menyalurkan daya dari pembangkit menuju konsumen akhir. Peningkatan beban akibat bertambahnya pengguna kerap menimbulkan potensi gangguan, baik yang bersumber dari faktor internal sistem maupun faktor eksternal. Salah satu jenis gangguan yang paling sering dijumpai adalah arus lebih, yang umumnya dipicu oleh terjadinya hubungan singkat ataupun *overload* [1]–[4].

Untuk mengantisipasi potensi gangguan pada sistem distribusi, diperlukan suatu mekanisme proteksi yang mampu mendeteksi sekaligus mengisolasi kerusakan dengan cepat. Salah satu perangkat proteksi yang umum digunakan adalah *Overcurrent Relay* (OCR), yang berfungsi memantau arus pada jaringan distribusi dan secara otomatis memutuskan aliran listrik ketika terdeteksi arus lebih. Mekanisme ini bertujuan mencegah kerusakan peralatan serta mempercepat proses pemulihan sistem [5]. Penelitian ini membahas performa OCR pada Penyulang Nginden 20 kV di PT PLN UP3 Surabaya Selatan, dengan fokus pada penentuan pengaturan (setting) yang optimal untuk meningkatkan keandalan dan stabilitas jaringan, sekaligus menekan kemungkinan terjadinya gangguan. Secara garis besar, sistem tenaga listrik terdiri atas empat bagian pokok, yaitu pembangkitan, transmisi, distribusi, dan pemanfaatan. Pembangkit listrik dapat bersumber dari berbagai jenis energi, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), maupun Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD).

Umumnya, pembangkit menghasilkan tegangan keluaran pada kisaran 11–24 kV. Tegangan tersebut dinaikkan menggunakan transformator daya di gardu induk menuju tingkat tegangan tinggi 154 kV, 220 kV, atau 500 kV, guna mengurangi rugi-rugi daya selama proses transmisi. Setelah mendekati wilayah beban, tegangan diturunkan kembali menjadi tegangan menengah (sekitar 20 kV) di gardu induk distribusi, kemudian disalurkan melalui jaringan distribusi primer. Selanjutnya, transformator distribusi menurunkan tegangan ke tingkat rendah, seperti 380/220 V atau 220/127 V, menyesuaikan kebutuhan konsumen akhir. Jaringan distribusi sendiri terbagi menjadi dua tingkatan, yaitu Jaringan Tegangan Menengah (JTM) dan Jaringan Tegangan Rendah (JTR). JTM umumnya menggunakan sistem tiga fasa empat kawat dengan tegangan nominal 20 kV, yang menghubungkan gardu induk dengan transformator distribusi atau langsung ke pelanggan tegangan menengah [6]–[8].

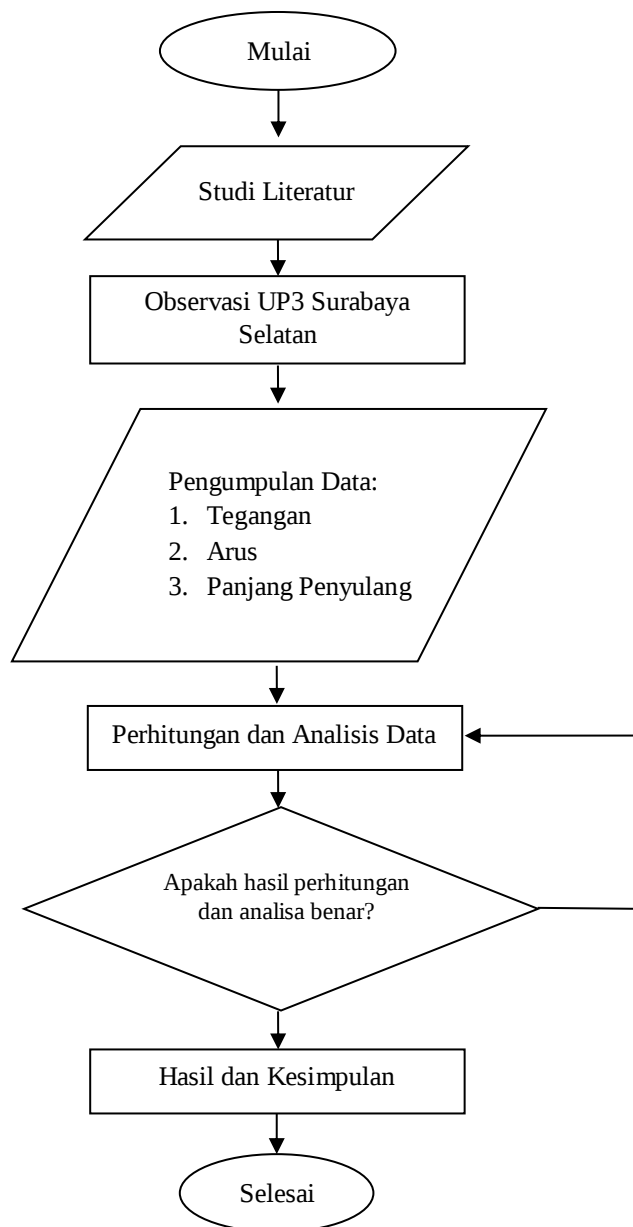
Sementara itu, JTR menyalurkan daya dari transformator distribusi ke pelanggan tegangan rendah, dengan tegangan umum 380 V untuk beban tiga fasa dan 220 V untuk beban satu fasa. Kedua tingkatan jaringan ini dapat berbagi tiang distribusi dengan satu kabel netral [9]. Dalam konteks keandalan sistem tenaga listrik, proteksi berfungsi mencegah dan mengisolasi gangguan dengan cepat dan tepat. Pada instalasi transformator daya 150/20 kV, sistem proteksi melibatkan kombinasi perangkat seperti relai proteksi, transformator arus (CT), perkabelan, sumber daya DC, dan pemutus tenaga (PMT) [10]. Proteksi dapat dikategorikan menjadi proteksi utama, yang bekerja langsung saat gangguan terdeteksi, dan proteksi cadangan, yang beroperasi jika proteksi utama gagal. Proteksi cadangan terbagi menjadi *local backup* (berada di lokasi yang sama dengan proteksi utama) dan *remote backup* (berada di lokasi berbeda) [11],[12]. Kontribusi penelitian ini terletak pada analisis komprehensif pengaturan OCR berdasarkan kondisi aktual Penyulang Nginden, yang menghasilkan rekomendasi setting relay optimal untuk meningkatkan sensitivitas, selektivitas, kecepatan, dan keandalan proteksi. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan teknis bagi optimalisasi sistem proteksi distribusi 20 kV, khususnya di wilayah dengan karakteristik beban dan jaringan yang serupa.

II. METODE PENELITIAN

A. Metode Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode deskriptif kuantitatif untuk menganalisis koordinasi proteksi arus lebih (*Overcurrent Relay*) pada Penyulang Nginden 20 kV di PT PLN UP3 Surabaya Selatan. Pendekatan ini dipilih karena

mampu memberikan gambaran terukur dan detail terkait karakteristik sistem proteksi, sekaligus memungkinkan analisis kuantitatif terhadap parameter teknis yang memengaruhi kinerjanya. Data penelitian diperoleh dari dua sumber, yaitu dokumen resmi PT PLN dan survei lapangan. Informasi yang dikumpulkan mencakup panjang penyulang, tegangan operasi, arus nominal, impedansi saluran, serta spesifikasi teknis peralatan proteksi. Pengukuran dan observasi langsung di lokasi dilakukan untuk memastikan kesesuaian data dengan kondisi aktual. Tahap berikutnya adalah studi literatur yang mencakup standar teknis (IEC dan SPLN), prinsip kerja OCR, perhitungan arus hubung singkat, serta metode penentuan setting relay. Literatur juga meliputi penelitian terdahulu guna membandingkan metode, hasil, dan mengidentifikasi peluang perbaikan. Metodologi ini diharapkan menghasilkan rekomendasi pengaturan OCR yang optimal, sehingga mampu meningkatkan keandalan, selektivitas, sensitivitas, dan kecepatan sistem proteksi pada jaringan distribusi 20 kV, khususnya pada kondisi lapangan aktual penyulang yang diteliti. Pengujian hasil setting yang direkomendasikan dilakukan melalui simulasi sistem proteksi untuk memverifikasi kinerja terhadap berbagai skenario gangguan. Hasil simulasi dibandingkan dengan pengaturan eksisting untuk menilai tingkat peningkatan kinerja yang diperoleh. Langkah ini memastikan bahwa rekomendasi yang diberikan tidak hanya teoritis, tetapi juga aplikatif dan layak diterapkan di lapangan.



Gambar 1. Flowchart

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tabel di bawah ini akan menunjukkan data Transformator Gardu Induk 150 KV Sukolilodan data penyulang Nginden. Data ini yang nantinya akan di gunakan untuk melakukan suatu perhitungan.

Tabel 1. Data Transformator GI Sukolilo

Parameter	Value
Merek	Pasti
Tegangan Primer	60 MVA
Tegangan Sekunder	150 kV
Impedansi	12,66 %
Vector Group	YN yn0 (d)

Tabel 2. Data Parameter

Parameter	Value
Tegangan	20 kV
Panjang	7,7 Km
Penyulang	AAAC
Jenis Penghantar	150 mm ²
Luas penghantar	

A. Menghitung Impedansi Sumber

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (1)$$

$$MVA_{SC} = \sqrt{3} \cdot 150 \cdot 60$$

$$= 1.558,84 \text{ MVA}$$

Didapat nilai hubung singkatnya sebesar 1.558,84 MVA, maka dapat dihitung impedansi sumber sebagai berikut [11]:

$$ZS_{primer} = \frac{kV(sisi\ primer)^2}{MVA\ hubung\ singkat} \quad (2)$$

$$ZS_{primer} = \frac{150^2}{1.558,84} = 14,4 \Omega$$

Karena analisis ini berfokus pada gangguan hubung singkat di sisi 20 kV, impedansi sumber perlu ditranslasikan ke sisi 20 kV guna menjamin tegangan sumber yang dipergunakan dalam perhitungan hubung singkat ialah 20 kV. Guna mengubah impedansi dari sisi 150 kV ke sisi 20 kV, gunakan rumus di bawah ini [11]:

$$ZS_{sekunder} = \frac{kV(sisi\ sekunder)^2}{kV(sisi\ primer)^2} \times ZS_{primer} \quad (3)$$

$$ZS_{sekunder} = \frac{20^2}{150^2} \times 14,4$$

$$= 0,256 \Omega$$

B. Menghitung Reaktansi Transformator

Transformator pada Gardu Induk memiliki nilai Z impedansi 12,66%. Dalam perhitungan impedansi transformator harus diperhatikan nilai perbandingan reaktansi dan resistansinya. Nilai impedansi transformator masih dalam bentuk sistem per unit, karena itu harus diubah dengan sisi sekunder 20 kV. Sebelum itu harus diketahui dulu nilai ohm pada 100 %, yaitu [11]:

$$X_{t(pada\ 100\%)} = \frac{kV(sekunder)^2}{MVA\ Transformator} \quad (4)$$

$$X_{t(pada\ 100\%)} = \frac{20^2}{60} = 6,66\ \Omega$$

Maka, nilai reaktansinya adalah:

- a. Reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{t1} = X_{t2}$)

$$X_t = 12,66\ \% \times 6,66\ \Omega \quad (5)$$

$$X_t = 0,843\ \Omega$$

- b. Reaktansi urutan nol (X_{t0})

Berdasarkan spesifikasi transformator memiliki *vector group* YN yn0 (d), maka:

$$X_{t0} = 3 \times X_t \quad (6)$$

$$X_{t0} = 3 \times 0,843 = 2,529\ \Omega$$

C. Perhitungan Impedansi Penyulang

Menentukan impedansi dari sebuah penyulang, yang dipengaruhi oleh jenis konduktor, luas penampang, serta panjang jaringan SUTM. Penyulang Nginden mempergunakan konduktor AAAC dengan luas penampang 150 mm² serta panjang 7,7 km. Nilai impedansi penyulang dideskripsikan dalam SPLN 64:1985, dengan impedansi urutan positif/negatif 0,2162 + j 0,3305 serta impedansi urutan nol 0,3631 + j 1,6180.

- a. Impedansi Penyulang Nginden urutan positif/negative

$$Z_1 = Z_2(Penghantar\ AAAC\ 150mm) \times L \quad (7)$$

$$Z_1 = (0,2162 + j\ 0,3305) \times 7,7km$$

$$Z_1 = 1,664 + j\ 2,544\ \Omega$$

- b. Impedansi Penyulang Nginden urutan nol

$$Z_0 = Z(Penghantar\ AAAC\ 150mm) \times L \quad (8)$$

$$Z_0 = (0,3631 + j\ 1,6180) \times 7,7km$$

$$Z_0 = 2,795 + j\ 12,458\ \Omega$$

Berdasarkan perhitungan seperti diatas, didapat hasil impedansi penyulang positif/negatif serta nol seperti pada tabel di bawah ini

Tabel 3. Besaran Nilai Impedansi Penyulang Urutan Positif atau Negatif serta Impedansi Nol

(% Panjang)	Jarak (Km)	Impedansi Penyulang Z_1 & Z_2 (Ω)	Impedansi Penyulang Z_0 (Ω)
10	0,77	0,166 + j 0,254	0,279 + j 1,245
20	1,54	0,332 + j 0,508	0,559 + j 2,491
30	2,31	0,499 + j 0,763	0,838 + j 3,737
40	3,08	0,665 + j 1,017	1,118 + j 4,983
50	3,85	0,832 + j 1,272	1,397 + j 6,229
60	4,62	0,998 + j 1,526	1,677 + j 7,475
70	5,39	1,165 + j 1,781	1,957 + j 8,721
80	6,16	1,331 + j 2,035	2,236 + j 9,966
90	6,93	1,498 + j 2,290	2,516 + j 11,212
100	7,7	1,664 + j 2,544	2,795 + j 12,458

Berdasarkan Tabel 3 data impedansi penyulang, nilai Z_1 dan Z_2 (urutan positif dan negatif) serta Z_0 (urutan nol) meningkat seiring bertambahnya jarak dari gardu induk. Kenaikan ini terjadi secara linier terhadap panjang penyulang karena resistansi dan reaktansi saluran bertambah proporsional dengan panjang konduktor. Impedansi Z_0 memiliki nilai lebih tinggi dibanding Z_1 dan Z_2 , terutama pada komponen reaktansi, akibat jalur arus gangguan satu fasa ke tanah yang melalui konduktor netral dan tanah, sehingga memiliki lintasan impedansi lebih besar.

D. Menghitung Impedansi Ekuivalen Penyulang

- a. Perhitungan impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_s + X_t + Z_{1p} \quad (9)$$

$$Z_{1eq} = 0,256 + j0,843 + (1,664 + j2,544)$$

$$Z_{1eq} = 1,920 + j3,387$$

- b. Perhitungan Impedansi ekuivalen urutan nol

$$Z_0 = Z_s + X_0 + Z_{0p} \quad (10)$$

$$Z_0 = 0,256 + j2,529 + (2,795 + j12,458)$$

$$Z_0 = 3,051 + j14,987$$

Berdasarkan perhitungan diatas, didapat hasil impedansi ekuivalen urutan positif/negatif serta nol sebagai berikut:

Tabel 4. Besaran Nilai Impedansi Penyulang Urutan Positif atau Negatif dan Urutan Nol

(% Panjang)	Jarak (Km)	Impedansi Ekuivalen Penyulang Z_1 & Z_2 (Ω)	Impedansi Ekuivalen Penyulang Z_0 (Ω)
10	0,77	0,422 + j 1,097	0,535 + j 3,774
20	1,54	0,588 + j 1,351	0,815 + j 5,020
30	2,31	0,755 + j 1,606	1,094 + j 6,266
40	3,08	0,921 + j 1,860	1,374 + j 7,512
50	3,85	1,088 + j 2,115	1,653 + j 8,758
60	4,62	1,254 + j 2,369	1,933 + j 10,004
70	5,39	1,421 + j 2,624	2,213 + j 11,250
80	6,16	1,587 + j 2,878	2,492 + j 12,495
90	6,93	1,754 + j 3,133	2,772 + j 13,741

100	7,7	1,920 + j 3,133	3,051 + j 14,987
-----	-----	-----------------	------------------

E. Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat pada Penyulang

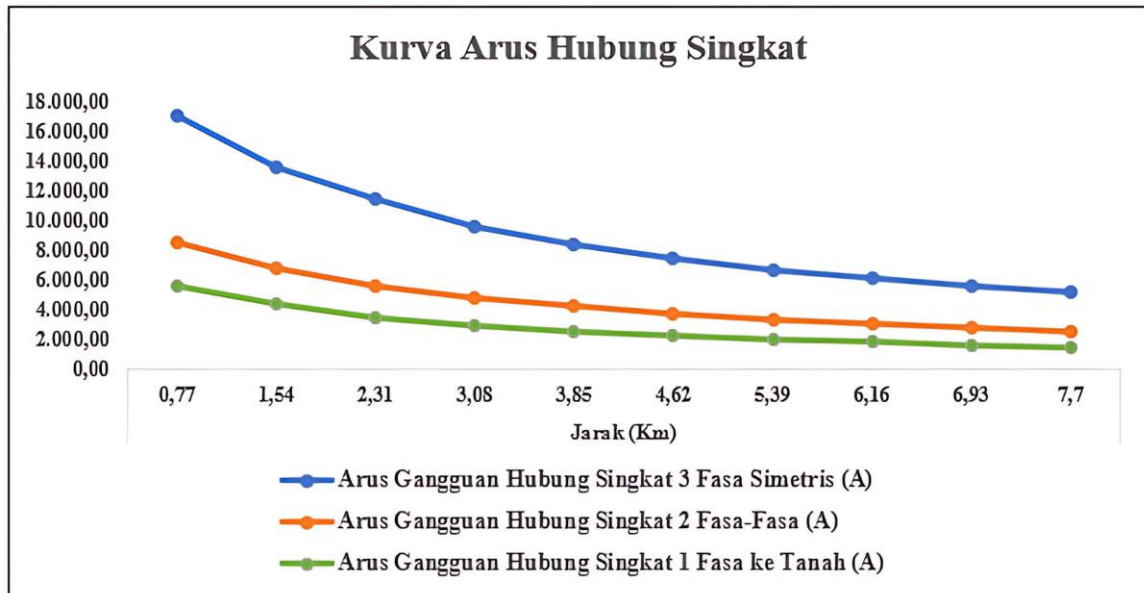
Setelah memperoleh nilai impedansi ekuivalen, perhitungan arus hubung singkat dapat dilakukan. Analisis yang dilakukan akibat terjadinya arus gangguan *short circuit* yaitu 3 fasa simetris, 2 fasa serta 1 fasa ke tanah. Lokasi jarak terjadinya gangguan hubung singkat pada 10 - 100% dari panjang penyulang disajikan dalam tabel di bawah ini:

Tabel 5. Hasil Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

(% Panjang)	Jarak (Km)	Nilai Arus yang Disebabkan Karena <i>Short Circuit</i> (A)		
		Tiga Fasa Simetris	Antar Fasa	Satu Fasa - Tanah
10	0,77	17.021,27	8.510,63	5.655,67
20	1,54	13.577,73	6.788,86	4.344,24
30	2,31	11.467,88	5.635,39	3.525,80
40	3,08	9.638,55	4.818,11	2.964,57
50	3,85	8.410,42	4.205,21	2.558,79
60	4,62	7.462,68	3.731,34	2.250,87
70	5,39	6.704,65	3.351,20	2.007,24
80	6,16	6.086,42	3.042,75	1.812,71
90	6,93	5.571,03	2.785,12	1.652,16
100	7,7	5.137,42	2.568,71	1.517,61

Berdasarkan hasil perhitungan arus hubung singkat pada Penyulang Nginden 20 kV, terlihat bahwa semakin jauh lokasi gangguan dari gardu induk, semakin kecil arus gangguan yang terjadi. Fenomena ini konsisten pada semua jenis gangguan, baik tiga fasa simetris, dua fasa-fasa, maupun satu fasa ke tanah. Untuk gangguan tiga fasa, arus hubung singkat tertinggi tercatat sebesar 17.021,27 A pada jarak 0,77 km (10% panjang penyulang) dan menurun hingga 5.137,42 A pada jarak 7,7 km (100% panjang penyulang). Gangguan dua fasa menunjukkan tren serupa, dengan nilai tertinggi 8.510,63 A di 10% penyulang dan terendah 2.568,71 A di 100% penyulang. Sementara itu, gangguan satu fasa ke tanah memiliki arus yang lebih rendah dibanding dua jenis gangguan lainnya, yaitu 5.655,67 A pada 10% penyulang dan 1.517,61 A di ujung penyulang.

Penurunan arus hubung singkat seiring bertambahnya jarak disebabkan oleh meningkatnya impedansi saluran, yang mengurangi besarnya arus gangguan. Pola ini menjadi dasar penting dalam penentuan setting proteksi OCR agar tetap sensitif terhadap gangguan yang terjadi pada seluruh panjang penyulang. Gangguan tiga fasa umumnya menghasilkan arus terbesar sehingga terdeteksi lebih cepat oleh relay, sedangkan gangguan satu fasa ke tanah memerlukan sensitivitas lebih tinggi. Dengan memahami karakteristik ini, pengaturan OCR dapat dioptimalkan untuk memastikan keandalan, selektivitas, dan kecepatan proteksi pada jaringan 20 kV. Untuk memahami dan menganalisis hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa Simetris, 2 fasa-fasa serta 1 fasa ke tanah ini dapat di lihat dalam kurva sebagai berikut



Gambar 2. Grafik Gangguan *Short Circuit* terhadap Lokasi Gangguan

Gambar 2 mengindikasikan nilai arus *short circuit* dipengaruhi oleh panjang jaringan dalam satuan kilometer. Panjang penyulang 100% dengan jarak titik gangguan 7,7 km mempunyai arus gangguan hubung singkat terkecil yaitu sebesar 1.517,61 A. Dengan bertambahnya panjang jaringan ataupun bertambahnya jarak ke lokasi gangguan, arus gangguan hubung singkat akan berkurang; sebaliknya, berkurangnya jarak ke titik gangguan akan meningkatkan arus hubung singkat. Arus gangguan hubung singkat maksimum sebesar 17.021,27 A terlihat selama hubung singkat tiga fase, relatif terhadap fase.

F. Perhitungan Setting Relay OCR

a. Setting Arus di Penyulang Nginden 20 kV

Pada penyulang Nginden menggunakan relay arus lebih dengan kurva standard invers dengan ketentuan arus setting sebesar 1,05 sampai 1,2 dan memiliki beban 480 A dengan rasio CT 1000/5. Guna memperoleh nilai arus setting relay arus lebih dihitung mempergunakan rumus [7]:

$$I_{set(primer)} = 1,2 \times I_{nominal} \quad (11)$$

$$I_{set(primer)} = 1,2 \times 480$$

$$I_{set(primer)} = 576 \text{ A}$$

Nilai di atas merupakan nilai setelan arus pada sisi primer, dan bagi nilai setelan arus pada sisi sekunder dapat dihitung dengan cara sebagai berikut [7]:

$$I_{set(sekunder)} = I_{set(primer)} \times \frac{1}{Rasio CT} \quad (12)$$

$$I_{set(sekunder)} = 576 \times \frac{1}{1000/5}$$

$$I_{set(sekunder)} = 2,88 \text{ A}$$

Sehingga didapat nilai setelan arus pada sisi sekunder sebesar 2,88 Ampere

b. Setting TMS

Pada perhitungan setting TMS ini menggunakan nilai perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa pada penyulang Nginden pada titik Lokasi gangguan 10 %. Diketahui nilai ketetapan waktu kerja relay adalah 0,3 detik, maka dapat di hitung dengan mempergunakan rumus sebagai berikut:

$$TMS = \frac{t \left[\left\{ \frac{Ifault}{I_{set(primer)}} \right\}^a - 1 \right]}{\beta} \quad (13)$$

$$TMS = \frac{0,3 \left[\left\{ \frac{17.021,27}{576} \right\}^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$TMS = \frac{0,3[1,07006 - 1]}{0,14}$$

$$TMS = 0,150 \text{ s}$$

G. Pemeriksaan Waktu Kerja Relay

Pada penyulang Nginden, menggunakan relay dengan karakteristik standard inverse. Dengan mengasumsikan gangguan dengan titik lokasi gangguan pada 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, dan 100% maka dapat dihitung waktu kerja relay dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$t = \frac{0,14 \times TMS}{\left(\frac{Ifault}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1} \quad (14)$$

$$t = \frac{0,14 \times 0,150}{\left(\frac{17.021,27}{576} \right)^{0,02} - 1}$$

$$t = \frac{0,021}{1,07006 - 1}$$

$$t = 0,299 \text{ s}$$

Temuan Perhitungan waktu kerja rele arus lebih pada gangguan 3 Fasa, 2 Fasa, 1 Fasa ke tanah dapat diamati pada tabel berikut

Tabel 6. Hasil Perhitungan Waktu Kerja Relay Arus Lebih

Lokasi Gangguan dari Penyulang (%)	Mulai Waktu OCR Penyulang Mendeteksi Gangguan (Detik)		
	3-Fasa Simetris	Antar Fasa	Satu Fasa - Tanah
10	0,299	0,379	0,449
20	0,321	0,415	0,509
30	0,340	0,449	0,569
40	0,362	0,483	0,630
50	0,381	0,517	0,693
60	0,399	0,551	0,760
70	0,417	0,585	0,830
80	0,434	0,629	0,905
90	0,452	0,655	0,986
100	0,469	0,691	1,073

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 6, dapat diamati bahwa waktu kerja relay Over Current Relay (OCR) memiliki pola yang konsisten terhadap lokasi gangguan pada penyulang Nginden. Semakin jauh lokasi gangguan dari gardu induk, semakin lama waktu yang dibutuhkan relay untuk mendeteksi dan merespons gangguan tersebut. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya impedansi total rangkaian seiring dengan bertambahnya panjang konduktor penyulang, yang mengakibatkan penurunan arus gangguan hubung singkat. Dari data yang diperoleh, gangguan yang terjadi pada lokasi 10% penyulang (0,77 km dari gardu induk) memiliki waktu deteksi tercepat, yaitu 0,299 detik untuk gangguan 3 fasa simetris. Sebaliknya, gangguan pada ujung penyulang (100% atau 7,7 km) memiliki waktu deteksi terlama, mencapai 1,073 detik untuk gangguan 1 fasa ke tanah. Perbedaan waktu deteksi yang signifikan ini menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara jarak gangguan dan waktu respons relay. Analisis terhadap jenis gangguan menunjukkan bahwa gangguan 3 fasa simetris memiliki waktu deteksi paling cepat pada setiap lokasi gangguan, diikuti oleh gangguan 2 fasa, serta gangguan 1 fasa ke tanah memiliki waktu deteksi terlama. Untuk gangguan 3 fasa, waktu deteksi berkisar antara 0,299 detik hingga 0,469 detik. Gangguan 2 fasa memiliki rentang waktu deteksi 0,379 detik hingga 0,691 detik, sedangkan gangguan 1 fasa ke tanah memiliki rentang waktu deteksi 0,449 detik hingga 1,073 detik.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, penelitian ini menyimpulkan bahwa arus hubung singkat pada Penyulang Nginden bervariasi signifikan, yaitu dari 1.517,61 A hingga 17.021,27 A, bergantung pada jenis gangguan dan lokasi terjadinya. Gangguan tiga fasa tercatat menghasilkan arus tertinggi, sedangkan gangguan satu fasa ke tanah menunjukkan arus terendah. Perhitungan pengaturan relay menunjukkan nilai arus setting sebesar 576 A dengan Time Multiplier Setting (TMS) 0,150 detik. Hasil simulasi waktu kerja relay bervariasi, mulai dari 0,299 detik pada gangguan tiga fasa di 10% panjang penyulang, hingga 1,073 detik pada gangguan satu fasa ke tanah di 100% penyulang. Rentang waktu deteksi tersebut, yaitu 0,299 – 1,073 detik, menunjukkan bahwa relay mampu merespons dengan cepat sesuai tingkat keparahan dan lokasi gangguan. Pengaturan ini dinilai memenuhi kriteria keandalan, selektivitas, sensitivitas, dan kecepatan dalam sistem proteksi distribusi 20 kV.

V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ibrahim, G. A., Joko, J., Wrahatnolo, T., & Agung, A. I. (2023). Analisis Koordinasi Setting Relay Proteksi Pada Jaringan Distribusi 20 kV di PT. PLN UP3 Kediri Gardu Induk Pare. *Jurnal Teknik Elektro*, 12(1), 28-36.

-
- [2] Romadhoni, M. L., Nasution, M. F., & Utami, R. M. (2022). Penerapan Pola Koordinasi Proteksi Non-Cascade Pada OCR Incoming dan OCR Penyulang Trafo. *ENERGI & KELISTRIKAN*, 14(1), 119-128.
 - [3] Prastyo, A., & Wati, T. (2024, May). Analisa Koordinasi Relay Proteksi OCR dan Recloser Pada Sistem Distribusi 20kV. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika (SNESTIK)* (Vol. 1, No. 1, pp. 16-24).
 - [4] Safitri, I., Gunawan, G., & Nugroho, A. A. (2020). Analisa Koordinasi Setting Proteksi Over Current Relay (OCR) Outgoing 20 kV dan Recloser pada Trafo II 60 MVA Feeder RBG 01 di Gardu Induk 150 kV Rembang. *Elektrika*, 12(1), 22-30.
 - [5] Syarifuddin, F. P. P., Gaffar, A., & Sultan, A. R. (2023). Analisis Kinerja Proteksi Over Current Relay (OCR) Pada Sisi 150/20 kV Transformator 30 MVA Gardu Induk Sengkang. *Journal of Applied Electrical and Energy System*, 1(1).
 - [6] Gumilang, F., Purnomo, B. P., & Prakoso, I. T. (2023). Analisis Koordinasi Sistem Proteksi Menggunakan Software ETAP Untuk Meningkatkan Keandalan Jaringan Distribusi Listrik 20 kV pada Perusahaan yang Bergerak di Bidang Pengolahan Makanan. *Jurnal Teknik Elektro*, 7(2), 74-85.
 - [7] Pasaribu, F. I., Roza, I., Siregar, C. A., & Sitompul, F. A. (2021). Analisa Proteksi Over Current Relay Pada Jaringan Tegangan Menengah 20 kV di PELINDO 1 Cabang Belawan. *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, 4(1), 18-26.
 - [8] Zulkarnaini, Z., Anthony, Z., Kartiria, K., & Afrianti, A. E. (2022). Studi Analisa Proteksi OCR dan GFR di Kubikel 20 kV Penyulang RSUD pada PT. PLN (Persero) Rayon Kuranji. *Jurnal Teknik Elektro*, 11(1).
 - [9] Arya, E. H., Ermawati, E., Machdalena, M., & Hendri, J. (2024). Analisa Over Current Relay (OCR) dan Ground Fault Relay (GFR) pada Jaringan Distribusi 20 kV. *Jurnal Surya Teknika*, 11(2), 755-764.
 - [10] Naibaho, N., & Pratama, F. M. (2024). Analisis Gangguan Sistem Koordinasi Proteksi Non-Cascade Penyulang 20 kV Di Gardu Induk Cengkareng. *Jurnal Elektro*, 12(1), 22-30.
 - [11] Slamet, P., Widagdo, R. S., Andriawan, A. H., & Al Ahyudi, M. (2024). Coordination Analysis of Overcurrent Relays (OCR) and Directional Ground Relays (DGR) for Transformer Protection at Segoromadu Substation, Gresik. *Wahana: Tridarma Perguruan Tinggi*, 76(2), 65-85.
 - [12] Widagdo, R. S., Budiono, G., Slamet, P., & Habibullah, M. S. A. (2024). Analysis of The Reliability Index of The Platuk Feeder Distribution System at PT. PLN ULP Kenjeran with Section Technique Method. *Jurnal Riset Rekayasa Elektro*, 6(2), 121-132.