

# Evaluasi Kinerja Sistem Proteksi Penyulang Trawas PT. PLN (PERSERO) ULP Pandaan

Satria Luthfi Hermawan<sup>\*a)</sup>, Hilman Rangga Nugraha Hermawan<sup>a)</sup>, Priya Surya Harijanto<sup>a)</sup>,  
Ahmad Hermawan<sup>a)</sup>

(Received 4 Juni 2024 || Revised 11 juni 2024 || Accepted 21 Juni 2024)

**Abstract:** *The primary objective of this research was to minimize disruptions in the feeder at ULP Pandaan by analyzing the coordination between recloser outgoing and incoming feeders. This study addressed the frequent issue of recloser trips, which caused instability in power supply. The purpose of this research was to provide conclusions and solutions to mitigate these disruptions. The methodology involved a detailed analysis of OCR (Over Current Relay) settings for protective devices on Trawas feeder. This included measurements of primary current settings and TMS (Time Multiplier Setting) values using both standard inverse and normal inverse configurations. Specific settings, such as 25518 A for the Trawas Recloser primary current and a TMS of 0.07, were determined to yield optimal performance. Additional settings for the Outgoing CB (Circuit Breaker) (357061 A, TMS 0.04) and the Incoming CB (181865 A, TMS 1.0) were also established. The important findings revealed that these settings significantly enhanced the reliability of the protective devices, ensuring better coordination between the recloser and CB systems. The implications of this research were substantial, as the optimized settings were expected to reduce the frequency and impact of feeder disruptions. This improvement in system reliability directly benefited both the electricity provider, PT. PLN (Persert), and the consumers by providing a more stable and efficient power supply. In conclusion, this study offered a comprehensive analysis and practical solutions for enhancing the protection system's performance on the Trawas feeder, which could be applied to similar electrical distribution networks to achieve better stability and reliability.*

**Keywords:** *Distribution system, feeder protection, Circuit Breaker, recloser, OCR*

## 1. Pendahuluan

Kebutuhan listrik di Indonesia terus meningkat seiring dengan pertumbuhan jumlah penduduk dan ekonomi. Keandalan infrastruktur ketenagalistrikan menjadi krusial untuk memenuhi permintaan energi yang terus berkembang ini. PT. PLN (Persero) sebagai penyedia utama energi listrik harus memastikan pasokan listrik yang stabil dan efisien. Gangguan pada sistem distribusi listrik dapat menyebabkan kerugian besar bagi penyedia dan konsumen [1], [2]. Oleh karena itu, penelitian yang bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi sangat diperlukan.

Salah satu permasalahan utama dalam sistem distribusi listrik adalah sering terjadinya gangguan teknis seperti hubungan pendek. Khususnya di ULP Pandaan, penyulang Trawas sering mengalami trip pada recloser yang menyebabkan ketidakstabilan pasokan listrik. Permasalahan ini menunjukkan kurangnya koordinasi antara recloser dan PMT dalam sistem proteksi. Gangguan tersebut tidak hanya mengganggu kontinuitas pasokan listrik, tetapi juga menambah biaya operasional karena frekuensi pemeliharaan yang tinggi. Penting untuk menemukan solusi efektif yang dapat mengurangi frekuensi dan dampak dari gangguan ini.

Penelitian sebelumnya telah mengembangkan berbagai metode untuk meningkatkan koordinasi proteksi dalam sistem distribusi listrik. Gumilang et al. menggunakan metode kualitatif untuk menganalisis kelemahan sistem proteksi, dan setelah setting ulang proteksi OCR serta simulasi ETAP, koordinasi proteksi yang ideal berhasil dicapai, meningkatkan keandalan dan selektivitas proteksi pada jaringan distribusi [3]. Dermawan dan Nugroho menganalisis gangguan hubung singkat pada penyulang tegangan menengah di PLN Gardu Induk Jababeka, menggunakan OCR dan GFR untuk meningkatkan sensitifitas, keandalan, selektivitas, dan kecepatan sistem proteksi. Studi kasus dilakukan pada Penyulang Rambutan untuk membandingkan setting relai proteksi hasil perhitungan dengan setting proteksi yang terpasang pada jaringan distribusi 20 kV [4]. Frediansyah et al. melakukan simulasi perhitungan nilai TDS dan  $I_{pickup}$  relai arus lebih menggunakan jaringan saraf tiruan *backpropagation* menggunakan Matlab

R2016a, dan menentukan nilai minimum MSE untuk mengatasi masalah utama koordinasi proteksi relai arus lebih di Pabrik Ammurea II PT. Petrokimia Gresik [5]. Fitria dan Maulana melakukan analisis dengan hasil koordinasi proteksi yang baik di Penyulang Meranti pada jaringan distribusi 20 kV yang mengalami kegagalan koordinasi zona proteksi, dengan 33 kegagalan pada tahun 2017, terutama karena zona 4, 5, dan 6 selalu trip bersamaan dengan zona 3 akibat setting waktu yang sama (0,05 tms), harus dimulai dari relai proteksi paling ujung dengan waktu tercepat dan naik setiap tahap sebesar 0,3 detik ke arah hulu [6]. Setiawati et al. mengindikasikan peningkatan pasokan daya listrik di PT. Petrokimia Gresik melalui jalur interkoneksi mengganggu kestabilan sistem ketika gangguan hubung singkat, karena koordinasi proteksi belum optimal. Solusinya, diperlukan perubahan setting relai dengan menggunakan relai arah arus lebih dan mengkoordinasikan time delay sesuai standar IEEE 242 untuk memastikan pemutusan selektif dan kestabilan sistem, yang hasilnya ditampilkan dalam kurva *Time Current Curve* (TCC) [7].

Meskipun berbagai metode telah dikembangkan, masih terdapat gap dalam hal optimasi koordinasi proteksi antara *recloser* dan PMT, terutama pada penyulang yang panjang seperti Penyulang Trawas. Penelitian terdahulu sering kali tidak memperhatikan secara spesifik pengaturan TMS yang optimal untuk berbagai kondisi gangguan. Selain itu, evaluasi terhadap keefektifan setting proteksi sering kali dilakukan tanpa simulasi yang komprehensif. Gap ini menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih holistik dan terintegrasi dalam pengaturan proteksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengatasi kekurangan tersebut dengan pendekatan yang lebih terstruktur dan mendalam.

Untuk mengisi celah yang ada, penelitian ini memperkenalkan konsep baru dalam pengaturan TMS yang disesuaikan dengan karakteristik spesifik penyulang. Penggunaan perangkat lunak ETAP 19.0.1 memungkinkan simulasi berbagai skenario gangguan untuk menentukan setting proteksi yang optimal. Selain itu, penelitian ini mengkaji secara mendalam pengaruh setting TMS terhadap keandalan sistem proteksi. Dengan demikian, konsep ini diharapkan dapat memberikan solusi praktis dan efektif. Penelitian

\* Korespondensi: [satria@polinema.ac.id](mailto:satria@polinema.ac.id)

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

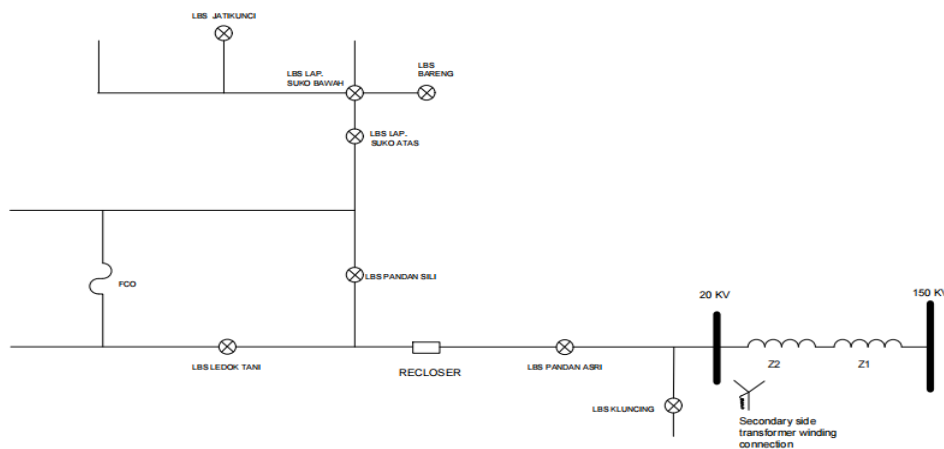
ini juga akan menghasilkan panduan yang dapat diterapkan pada penyulang lainnya di jaringan distribusi listrik.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi pada penyulang Trawas di ULP Pandaan. Penelitian ini berupaya untuk mengidentifikasi setting OCR dan TMS yang optimal untuk mengurangi frekuensi dan dampak gangguan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk meningkatkan koordinasi antara recloser dan PMT. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan solusi yang aplikatif dan mudah diterapkan di lapangan. Dengan demikian, penelitian ini akan berkontribusi pada peningkatan kualitas layanan PT. PLN (Persero) dalam menyediakan pasokan listrik yang stabil dan efisien.

## 2. Metode

### 2.1 Diagram Segaris Penyulang Trawas

Penyulang Trawas merupakan penyulang di area rayon



GAMBAR 2.1 DIAGRAM SATU GARIS PENYULANG TRAWAS DISEDERHANAKAN

Berdasarkan Gambar 2.1 dapat diperhatikan bahwa arus listrik dari GI mula-mula melewati Pemutus Tenaga (PMT) *incoming* yang berfungsi sebagai proteksi utama sebelum disalurkan melalui Penyulang Trawas. Di tengah jalur penyulang, terdapat *Recloser* yang berfungsi untuk mendeteksi dan mengisolasi gangguan sementara dengan membuka dan menutup kembali sirkuit secara otomatis, guna meminimalkan pemadaman pada pelanggan [xx], [xx]. Setelah itu arus melewati PMT *Outgoing* yang menyediakan proteksi tambahan sebelum mencapai beban. Terdapat pula proteksi berupa *Fuse Cut Out (FCO)* di titik percabangan. Gambar 2.1 dapat digunakan untuk memudahkan diagnostik dan identifikasi titik gangguan di penelitian ini.

### 2.2 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga listrik, terutama pada Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM). Gangguan ini dapat disebabkan oleh pohon, layang-layang terbang, isolator rusak, kabel putus, dan lain-lain [8], [9]. Hubung singkat dalam sistem tenaga listrik mencakup hubung singkat antar fasa (hubung singkat 3 fasa dan hubung singkat 2 fasa) serta hubung singkat fasa ke tanah (hubung singkat 1 fasa ke tanah, 2 fasa ke tanah, dan 3 fasa ke tanah) [10], [11].

Menghitung arus hubung singkat adalah langkah penting dalam analisis sistem tenaga listrik untuk memastikan bahwa peralatan

Pasuruan PT. PLN (Persero) unit layanan Pandaan, yang dipasang dari Gardu Induk (GI) Pandaan Baru dengan menggunakan transformator merek Schneider berkapasitas 60 MVA. Penyulang Trawas terdiri dari 87 gardu distribusi dengan daya terpasang 22.255 kVA. Selain itu, penyulang Trawas dilengkapi dengan beberapa perangkat pengaman yang terdiri dari sebuah *recloser*, sembilan *Load Break Switch (LBS)*, dan sepuluh *Cut Out (CO)*. *Recloser* yang digunakan adalah *Recloser Trawas*, sementara untuk LBS terdapat 9 LBS yang terdiri dari LBS section 1, LBS Kluncing, LBS Petung Asri, LBSM Ledok Tani, LBS Pandan Sili, LBS di Suko Atas dan Bawah, LBSM Bersama, dan LBSM Jati Kunci. Untuk CO, terdapat CO Subandri, CO PT. Tirta Mas, CO Sumber Tirta, CO Sekarjoho, CO Mbrubuh, CO Insiajati, CO Simon P, CO PT. Asa, CO Wonosoyo, dan CO Varia Usaha.

Gambar 2.1 menunjukkan diagram satu garis yang disederhanakan dari Penyulang Trawas di PT. PLN (Persero) ULP Pandaan.

proteksi dapat mengatasi gangguan yang terjadi. Persamaan dasar menghitung arus gangguan hubung singkat adalah [12]:

$$I = \frac{V}{Z} \text{ (A)} \quad (2-1)$$

Dengan  $I$  adalah arus yang mengalir pada resistansi  $Z$ ,  $V$  adalah tegangan sumber ( $V$ ), dan  $Z$  adalah impedansi jaringan dari sumber ke titik gangguan (ohm). Pada umumnya yang diperhitungkan hanya nilai reaktansi karena nilainya sangat besar.

Tahapan menghitung arus gangguan hubung singkat diawali dengan menghitung reaktansi sumber ( $X_{source}$ ) menggunakan Persamaan (2-2).

$$X_{source} = \frac{kV^2}{MVA_{sc}} = \frac{kV^2}{\sqrt{3} \cdot V_{f-f} \cdot I_{sc}} \text{ (ohm)} \quad (2-2)$$

Dengan  $kV$  adalah tegangan sumber ( $kV$ ),  $MVA_{sc}$  adalah kapasitas hubung singkat ( $MVA$ ),  $V_{f-f}$  adalah tegangan sistem ( $kV$ ), dan  $I_{sc}$  arus hubung singkat ( $kA$ ).

Selanjutnya menghitung reaktansi transformator menggunakan Persamaan (2-3).

$$X_T = X(\%) \times \frac{kV^2}{MVA} \text{ (ohm)} \quad (2-3)$$

Dengan  $X(\%)$  adalah nilai impedansi yang terdapat di plat nama transformator.

Kemudian menghitung impedansi jaringan distribusi yang mencakup impedansi dari saluran transmisi dan distribusi. Impedansi ini dihitung dengan menjumlahkan impedansi dari setiap komponen di sepanjang jalur arus hubung singkat. Nilai impedansi

ini biasanya dinyatakan dalam ohm atau per unit (pu).

Dilanjutkan menghitung arus hubung singkat 3-fasa menggunakan Persamaan (2-4), arus hubung singkat 2-fasa menggunakan Persamaan (2-5), dan arus hubung singkat 1-fasa ke tanah menggunakan Persamaan (2-6).

$$I_f = \frac{V_f}{Z_1 + Z_f} \quad (2-4)$$

$$I_f = \frac{j\sqrt{3}V_f}{Z_1 + Z_2} \quad (2-5)$$

$$I_f = \frac{3V_f}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2-6)$$

Keterangan:

$I_f$  = arus gangguan hubung singkat (pu)

$V_f$  = tegangan pada titik gangguan (pu)

$Z_1$  = impedansi urutan positif

$Z_2$  = impedansi urutan negatif

$Z_0$  = impedansi urutan nol

$Z_f$  = impedansi di titik gangguan

### 2.3 Pengaturan dan Koordinasi Proteksi Penyulang

Pengaturan relai dalam sistem proteksi penyulang bertujuan untuk memastikan bahwa arus yang melewati relai sesuai dengan nilai yang telah diatur, untuk melindungi sistem distribusi dari gangguan [13]. Dalam penelitian ini, analisis setting relai dilakukan untuk menyelaraskan operasi antara *recloser* dan *Circuit Breaker* (CB) pada penyulang Trawas PT. PLN (Persero) ULP Pandaan, guna mengurangi frekuensi dan dampak gangguan. Proses ini dimulai dengan menentukan nilai arus nominal yang melewati relai. Arus nominal adalah arus yang biasanya diharapkan dalam operasi normal sistem. Nilai ini dihitung berdasarkan kapasitas beban dan karakteristik teknis dari sistem distribusi yang dilindungi [14]. Arus nominal ini akan menjadi dasar untuk menentukan pengaturan arus primer (*primary current setting*) dan arus sekunder (*secondary current setting*) pada relai.

Langkah berikutnya adalah menentukan pengaturan *Time Multiplier Setting* (TMS), yang mengatur respons waktu relai terhadap gangguan. TMS merupakan faktor pengali yang menentukan seberapa cepat relai akan bereaksi terhadap kenaikan arus yang melebihi nilai yang diatur. Semakin rendah nilai TMS, semakin cepat relai akan bereaksi. Penentuan TMS harus mempertimbangkan keseimbangan antara memberikan perlindungan yang cepat dan mencegah operasi yang tidak perlu akibat fluktuasi arus yang kecil atau gangguan sementara. Pengaturan TMS biasanya dilakukan dengan mempertimbangkan karakteristik inverse time dari relai, dimana waktu operasi relai berkurang seiring dengan peningkatan arus gangguan [15].

Setelah menentukan nilai arus nominal dan TMS, langkah selanjutnya adalah melakukan kalibrasi relai. Kalibrasi ini melibatkan pengaturan fisik pada relai untuk memastikan bahwa pengaturan yang telah ditentukan diterapkan dengan benar. Proses ini biasanya dilakukan dengan menggunakan peralatan pengujian khusus yang dapat mensimulasikan kondisi operasi dan gangguan pada sistem. Kalibrasi yang akurat sangat penting untuk memastikan bahwa relai akan berfungsi sesuai dengan pengaturan yang telah ditentukan, sehingga dapat memberikan perlindungan yang efektif bagi sistem distribusi.

Selanjutnya, dilakukan uji koordinasi proteksi untuk memastikan bahwa semua perangkat proteksi dalam jaringan bekerja secara sinergis. Uji koordinasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa relai yang terdekat dengan lokasi gangguan akan bereaksi terlebih dahulu, sedangkan relai lain akan bereaksi

secara bertahap sesuai dengan tingkat keparahan gangguan [xx]. Hal ini penting untuk mengisolasi gangguan pada titik terdekat, sehingga meminimalkan dampak pada seluruh jaringan. Uji koordinasi ini biasanya dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak simulasi yang dapat mensimulasikan berbagai skenario gangguan dan respons relai.

Terakhir, dilakukan pemantauan dan penyesuaian berkala terhadap pengaturan relai. Kondisi operasional dan beban pada sistem distribusi dapat berubah dari waktu ke waktu, sehingga pengaturan relai perlu disesuaikan secara berkala untuk memastikan bahwa perangkat proteksi tetap efektif. Pemantauan ini melibatkan analisis data operasional dan kinerja relai selama periode tertentu, serta melakukan penyesuaian jika diperlukan. Dengan melakukan pemantauan dan penyesuaian secara berkala, keandalan sistem proteksi dapat dijaga, sehingga sistem distribusi dapat beroperasi dengan lebih aman dan efisien.

### 2.4 Kronologi Penelitian

Penelitian ini mengikuti desain penelitian eksperimental dengan pendekatan simulasi untuk mengkaji efektivitas koordinasi proteksi pada penyulang Trawas. Langkah pertama dalam prosedur penelitian adalah pengumpulan data, termasuk arus nominal, kapasitas transformator, jenis dan panjang kabel, serta karakteristik teknis dari perangkat proteksi yang digunakan. Data ini diperoleh dari laporan teknis PT. PLN (Persero) dan data plat nama peralatan. Selanjutnya, sistem distribusi penyulang Trawas dimodelkan dalam perangkat lunak ETAP, mencakup semua komponen utama seperti transformator, relai, circuit breaker, *recloser*, dan kabel.

Simulasi gangguan dilakukan untuk berbagai jenis gangguan, termasuk hubung singkat satu fasa, dua fasa, dan tiga fasa. Gangguan disimulasikan pada berbagai titik di sepanjang penyulang untuk mengevaluasi respons proteksi. Berdasarkan hasil simulasi, pengaturan arus primer dan sekunder pada OCR, serta nilai Time Multiplier Setting (TMS) ditentukan. Pengaturan ini diuji kembali dalam simulasi untuk memastikan efektivitasnya. Evaluasi koordinasi proteksi dilakukan dengan menganalisis hasil simulasi, termasuk analisis waktu operasi relai dan urutan pemutusan arus.

Instrumen utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat lunak ETAP untuk simulasi dan analisis sistem proteksi. Selain itu, peralatan pengujian relay dan circuit breaker digunakan untuk kalibrasi dan pengaturan perangkat proteksi. Teknik analisis yang digunakan meliputi analisis kurva karakteristik waktu-arus relai, analisis arus gangguan, dan evaluasi kinerja sistem proteksi melalui simulasi. Hasil analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi pengaturan optimal yang memastikan koordinasi proteksi yang efektif.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Perhitungan Reaktansi Sumber

Data arus hubung singkat pada bus trafo 150 kV Gardu Induk Pandaan Baru adalah 14,76 kA. Oleh karena itu nilai reaktansi sumber pada sisi 150 kV dihitung menggunakan Persamaan 2.2 sebagai berikut.

$$X_{source} = \frac{150^2}{\sqrt{3} \cdot 150 \text{ kV} \cdot 14,76 \text{ kA}} = j5,867 \Omega$$

Nilai reaktansi itu dihitung pada sisi tegangan 150 kV, apabila ditransformasikan ke sisi 20 kV maka perhitungannya sebagai berikut

$$X_{source} = \frac{20^2}{150^2} = j0,1043 \Omega$$

### 3.2 Perhitungan Reaktansi Transformator

Diketahui nilai impedansi Trafo 5 GI Pandaan Baru sebesar 11.62 %, maka nilai reaktansi transformator urutan positif ( $X_{T1}$ ) dan negatif ( $X_{T1}$ ) dihitung menggunakan Persamaan (2-3).

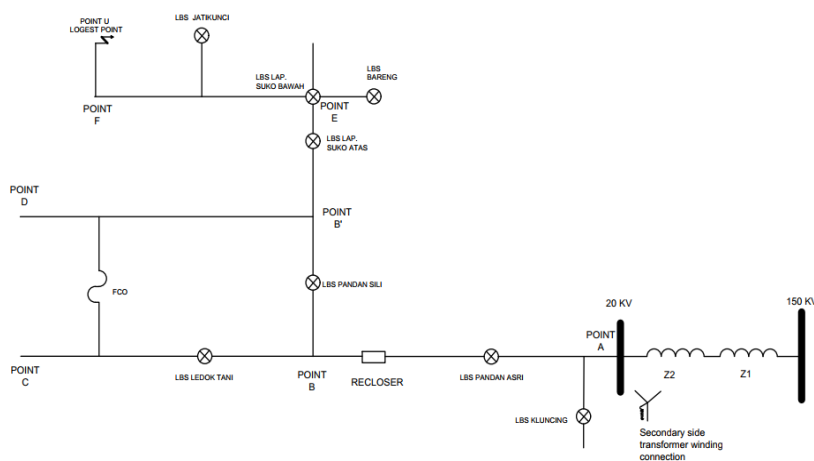
$$X_{T1} = X_{T2} = \frac{20^2}{60} \times 11,62\% = j0,774 \Omega$$

Sedangkan untuk menghitung reaktansi urutan nol dari trafo diidentifikasi dahulu hal berikut. Sambungan belitan Trafo V Kraksaan penyulang Trawas mempunyai sambungan belitan

YNyn0 yang tidak terdapat belitan delta di dalamnya, sehingga nilai  $X_{T0}$  berkisar antara 9 sampai dengan  $14X_{T1}$ . Apabila  $X_{T0}$  dianggap  $10X_{T1}$ , maka  $X_{T0} = 0,774 \Omega \times 10 = 7,74 \Omega$

### 3.3 Perhitungan Impedansi Penyulang

Perhitungan impedansi penyulang tergantung besarnya impedansi per km ( $\Omega/km$ ) penyulang yang bersangkutan. Penyulang Trawas menggunakan saluran udara dengan konduktor A3C/A3CS. Dalam menghitung impedansi urutan positif, negative, dan nol Penyulang Trawas, harus ditentukan terlebih dahulu titik gangguan terjauh dari GI Pandaan Baru (titik A), yaitu titik U seperti terlihat pada Gambar 3.1.



GAMBAR 3.1 TITIK GANGGUAN SEBAGAI ACUAN PERHITUNGAN HUBUNG SINGKAT

Di antara titik A sampai dengan titik U terdapat penghantar dengan jenis XLPE 240 mm<sup>2</sup>, XLPE 150 mm<sup>2</sup>, A3C 150 mm<sup>2</sup>, A3C 70 mm<sup>2</sup>. Nilai impedansi berdasarkan SPLN no.64 tahun 1985. Rekapitulasi impedansi urutan positif, negatif, dan nol dari titik A sampai dengan titik U dapat dilihat di Tabel 3.1.

TABEL 3.1 NILAI IMPEDANSI URUTAN POSITIF, NEGATIF, DAN NOL DARI TITIK A SAMPAI DENGAN TITIK U

Titik	Z1eq = Z2eq		Z0eq	
	R (Ω)	jX (Ω)	R (Ω)	jX (Ω)
Titik A	0,266	0,137	0,466	0,387
Titik B	1,607	2,187	2,718	10,425
Titik B'	0,914	1,128	1,555	5,241
Titik C	2,953	4,2458	4,979	20,504
Titik D	2,260	3,346	3,816	15,320
Titik E	3,144	4,5368	5,299	31,928
Titik F	4,279	6,2718	7,205	40,422
Titik U	4,55	6,4818	7,564	41,392

### 3.4 Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat

Rekapitulasi nilai gangguan hubung singkat 3-fasa 3Ø, 2-fasa 2Ø, dan 1-fasa ke tanah 1Ø-G dari Titik A sampai dengan Titik U dapat dilihat di Tabel 3.2.

TABEL 3.2 ARUS GASNGGUAN HUBUNG SINGKAT 3Ø, 2Ø, 1Ø-G TITIK A-F

Lokasi Titik Gangguan	3Ø (A)	2Ø (A)	1Ø-G (A)
A	12242,129	10601,878	21,576
B	3427,727	2968,733	20,524
C	1981,465	1716,461	20,438

D	2456,047	2126,957	20,534
E	1870,614	1619,466	20,326
F	1399,496	1212,435	20,264
U	1347,535	1167,401	20,172

Contoh perhitungan arus hubung singkat 3-fasa di titik A adalah sebagai berikut. Ditentukan  $MVA_{base}$  yaitu 60 MVA dan  $kV_{base}$  sebesar 20 kV sehingga  $Z_{base} = \frac{kV_{base}^2}{MVA_{base}} = \frac{20^2}{60} = 6,66 \Omega$ . Nilai setiap impedansi diubah ke satuan per unit (pu) dengan membagi nilai impedansi riil dengan nilai  $Z_{base}$ . Sehingga perhitungan impedansi total dalam pu untuk gangguan di titik A adalah sebagai berikut.

$$Z_1 = Z_2 = Z_s + Z_{1T} + Z_{1A}(\text{saluran})$$

$$= j0,01564 + j0,1 + (0,0399 + j0,0205) \text{ pu}$$

$$= 0,039 + j0,136 \text{ pu}$$

$$Z_0(\text{Total}) = 3Z_N + Z_{OT} + Z_{OA}(\text{saluran})$$

$$= 252,225 + j0,1 + (0,0699 + j0,0581)$$

$$= 252,294 + j0,158 \text{ pu}$$

Arus gangguan 3-fasa di titik A dihitung menggunakan Persamaan (2-4) dengan asumsi  $Z_f = 0$ .

$$I_f = \frac{1}{0,039 + j0,136} = 1,948 - j6,794 \text{ pu} = 7,068 \angle -73,998^\circ \text{ pu}$$

$$= 12242,129 \text{ A}$$

Sedangkan perhitungan arus gangguan hubung singkat 2-fasa dan 1-fasa ke tanah bisa dihitung menggunakan persamaan yang sesuai.

### 3.5 Pengaturan OCR

Berdasarkan data, kapasitas trafo distribusi di sekitar *recloser* Trawas adalah 8430 kVA sehingga arus beban maksimal adalah:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V} = \frac{8430}{\sqrt{3} \cdot 20} = 243,35 \text{ A}$$

Pengaturan nilai Standard Inverse ( $I >$ ) relai yaitu:  
 $I_{SET (primary)} = 1,05 \times I_{load} = 1,05 \times 243,35 = 255,18 \text{ A}$

$$I_{SET (sec)} = I_{set (primary)} \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} = 255,18 \times \frac{5}{400} = 3,2 \text{ A}$$

Jadi pengaturan OCR untuk Penyulang Trawas adalah 3,2 A

Sedangkan pengaturan nilai TMS ( $t_d >$ ) di *Recloser* Trawas adalah sebagai berikut.

$$Tms = \frac{t \times \left[ \left( \frac{I_{FAULT}}{I_{SET}} \right)^\alpha - 1 \right]}{\beta} = \frac{0,3 \times \left[ \left( \frac{1347,535}{255,18} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14} = 0,07$$

Kemudian waktu kerja sebenarnya

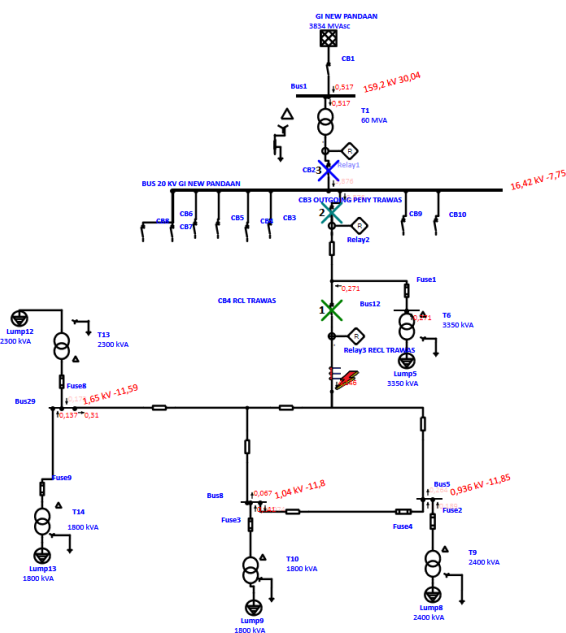
$$t = \frac{0,14 \times Tms}{\left[ \left( \frac{I_{FAULT}}{I_{SET}} \right)^{0,02} - 1 \right]} = \frac{0,14 \times 0,1}{\left[ \left( \frac{1347,535}{255,18} \right)^{0,02} - 1 \right]} = 0,3 \text{ Second}$$

Waktu instan ( $t >>$ ) is 0.1 S

Pengaturan OCR pada PMT *Outgoing* Penyulang Trawas maupun *Incoming* Penyulang Trawas menggunakan Langkah yang sama dengan perhitungan sebelumnya.

### 3.6 Simulasi Koordinasi

Gambar 3.2 merupakan gambar diagram segaris Penyulang Trawas yang dimodelkan di program ETAP, kemudian disimulasikan untuk mengetahui kinerja koordinasi sistem proteksi.



GAMBAR 3.2 SIMULASI KOORDINASI OCR DENGAN GANGGUAN DI ZONA 3

Berdasarkan Gambar 3.2 dan hasil simulasi di ETAP, ketika terjadi gangguan antar fasa di zona 3, dan jika gangguan tersebut bersifat sementara, maka pertama kali trip adalah *recloser* OCR Trawas. Setelah 60 detik waktu penutupan, *recloser* Trawas akan menutup kembali, karena gangguan tersebut bersifat sementara.

Sistem kembali normal dengan pengaman cadangan berupa PMT *Outgoing* Penyulang Trawas. Ketika terjadi gangguan antar fasa di zona 3, dan jika gangguan tersebut bersifat permanen, maka *recloser* OCR Trawas akan trip dan terkunci (trip permanen) sesuai dengan pengaturan. Sebagai pengaman cadangan adalah PMT *Outgoing* Feeder Trawas.

### 4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi dan mengoptimalkan pengaturan OCR dan TMS pada Penyulang Trawas di PT. PLN (Persero) ULP Pandaan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengaturan arus primer sebesar 25.518 A dan TMS 0,07 untuk *recloser* Trawas, arus 357.061 A dan TMS 0,04 untuk PMT *Outgoing*, serta arus 181.865 A dan TMS 1,0 untuk PMT *Incoming* adalah pengaturan yang optimal untuk meningkatkan keandalan sistem proteksi.

Simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 19.0.1 menunjukkan bahwa pengaturan ini mampu mengurangi frekuensi dan dampak gangguan pada Penyulang Trawas. Gangguan sementara yang terjadi di zona 3 dapat diatasi dengan cepat oleh *recloser* OCR Trawas yang akan trip dan menutup kembali setelah 60 detik, mengembalikan sistem ke kondisi normal. Sedangkan untuk gangguan permanen, *recloser* akan trip dan terkunci, dengan PMT *Outgoing* sebagai pengaman cadangan.

Penelitian ini juga menemukan bahwa koordinasi proteksi antara *recloser* dan PMT pada penyulang Trawas sangat penting untuk memastikan bahwa gangguan dapat diisolasi pada titik terdekat dengan gangguan, meminimalkan dampak pada seluruh jaringan. Uji koordinasi proteksi menunjukkan bahwa perangkat proteksi bekerja secara sinergis, dengan relai yang terdekat dengan lokasi gangguan bereaksi terlebih dahulu, diikuti oleh relai yang lebih jauh jika diperlukan.

Pengaturan dan kalibrasi yang tepat pada perangkat proteksi, serta pemantauan dan penyesuaian berkala, sangat penting untuk menjaga keandalan sistem distribusi listrik. Hasil penelitian ini memberikan panduan praktis yang dapat diterapkan pada sistem distribusi listrik lainnya untuk meningkatkan stabilitas dan efisiensi pasokan listrik.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan kualitas layanan PT. PLN (Persero) dalam menyediakan pasokan listrik yang stabil dan efisien, tetapi juga memberikan solusi praktis dan aplikatif yang dapat diterapkan pada jaringan distribusi listrik serupa. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi upaya peningkatan keandalan sistem proteksi di berbagai penyulang di Indonesia.

### Referensi

- [1] C. Rochman, O. Penangsang, and N. K. Aryani, "Manajemen Gangguan Jaringan Distribusi 20 kV Kota Surabaya berbasis Geographic Information System (GIS) menggunakan Metode Algoritma Genetika," *J. Tek. ITS*, vol. 6, no. 1, pp. B51–B56, Mar. 2017, doi: 10.12962/J23373539.V6I1.21304.
- [2] H. Handayani, "Evaluasi Keandalan Sistem Distribusi 20 kV Menggunakan Metode SAIDI dan SAIFI di PT. PLN (Persero) Rayon Lubuk Alung Tahun 2015," *J. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 170–179, 2017.
- [3] F. Gumilang, B. Purnomo, I. Tri Prakoso, A. Koordinasi Sistem Proteksi Menggunakan Software Etap Untuk



- Meningkatkan Keandalan Jaringan Distribusi Listrik, and K. Pada Perusahaan Yang Bergerak Di Bidang Pengolahan Makanan, "ANALISIS KOORDINASI SISTEM PROTEKSI MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN JARINGAN DISTRIBUSI LISTRIK 20 KV PADA PERUSAHAAN YANG BERGERAK DI BIDANG PENGOLAHAN MAKANAN," *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 2, pp. 74–85, Oct. 2023, doi: 10.31000/JTE.V7I2.9808.
- [4] E. Dermawan and D. Nugroho, "Analisa Koordinasi Over Current Relay Dan Ground Fault Relay Di Sistem Proteksi Feeder Gardu Induk 20 kV Jababeka," *eLEKTUM*, vol. 14, no. 2, pp. 43–48, Oct. 2017, doi: 10.24853/ELEKTUM.14.2.43-48.
- [5] A. Frediansyah *et al.*, "Koordinasi Proteksi Relai Arus Lebih pada Sistem Distribusi Radial Menggunakan Jaringan Syaraf Tiruan Perambatan Balik," *Elektrika*, vol. 14, no. 1, pp. 7–13, Apr. 2022, doi: 10.26623/ELEKTRIKA.V14I1.4474.
- [6] D. Fitria and M. A. Maulana, "ANALISIS PEMBAGIAN ZONA PROTEKSI PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 kV PENYULANG MERANTI GI BUNGERAN UNTUK MENINGKATKAN PELAYANAN KE KONSUMEN," *J. Ampere*, vol. 5, no. 2, pp. 68–74, Dec. 2020, doi: 10.31851/AMPERE.V5I2.5056.
- [7] N. E. Setiawati, M. Pujiantara, S. Anam, and J. T. Elektro, "Koordinasi Proteksi Directional Overcurrent Relay dengan Mempertimbangkan Gangguan Arah Arus di Pabrik PT. Petrokimia Gresik," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, Jan. 2017, doi: 10.12962/J23373539.V5I2.16049.
- [8] A. H. Santoso, M. Saputra, and R. Sutjipto, "Studi Penambahan OCR dan GFR Gardu Hubung Gondol untuk Mengurangi Gangguan Meluas Penyulang Banyupoh," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 9, no. 2, pp. 28–33, Jun. 2022, doi: 10.33795/ELPOSYS.V9I2.612.
- [9] J. T. I. Kume, F. Lisi, and S. Silimang, "Analisa Gangguan Hubung Singkat Saluran Kabel Bawah Tanah Tegangan 20 kV Penyulang SL 3 GI Teling Manado," *J. Tek. Elektro dan Komput.*, vol. 5, no. 4, pp. 46–52, Sep. 2016, doi: 10.35793/JTEK.V5I4.13396.
- [10] A. Hermawan, R. A. Ananto, and R. D. Kuncoro, "Analisis Resetting Relay Dan Load Presentase Terhadap Pola Pelaksanaan Dan Pemeliharaan Pada Gardu Induk 150 Kv Saketi Banten," *Elposys J. Sist. Kelistrikan*, vol. 8, no. 2, pp. 50–56, Jun. 2021, doi: 10.33795/ELPOSYS.V8I2.632.
- [11] L. Ali, A. Aksan, and A. R. Sultan, "ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA JARINGAN DISTRIBUSI 20 KV DI GARDU INDUK DAYA," *J. Ilm. Flash*, vol. 5, no. 1, pp. 16–22, Jun. 2019, doi: 10.32511/FLASH.V5I1.628.
- [12] A. S. Sampeallo, P. J. Fischer, and J. Teknik Elektro, "ANALISIS GANGGUAN HUBUNG SINGKAT PADA JARINGAN PEMAKAIAN SENDIRI PLTU BOLOK PT. SMSE (IPP) UNIT 3 DAN 4 MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6.0," *J. Media Elektro*, vol. VIII, no. 1, pp. 76–85, Apr. 2019, doi: 10.35508/JME.V8I1.1442.
- [13] F. Djauhari, I. Kusuma, E. R. Nugroho, and A. L. Niam, "Evaluasi Sistem Proteksi dan Koordinasi Relai Arus lebih Gedung Mall XYZ Menggunakan ETAP 19.0.1," *J. Ilm. Giga*, vol. 25, no. 2, pp. 76–87, Nov. 2022, doi: 10.47313/JIG.V25I2.1915.
- [14] E. S. Nasution *et al.*, "Rele diferensial sebagai proteksi pada transformator daya pada gardu induk," pp. 179–186, 2015.
- [15] M. A. Bayu, N. Arif, Suryani, and H. Nirwana, "ANALISA PENGGUNAAN RECLOSER 3 PHASA 20 KV PENYULANG PAJALAU UNTUK PENGAMAN ARUS LEBIH PT. PLN (PERSERO) ULP KALEBAJENG," *Kohesi J. Sains dan Teknol.*, vol. 1, no. 3, Sep. 2023, doi: 10.3785/KJST.V1I3.135.