

ANALISIS KINERJA *CIRCUIT BREAKER* PADA SISI 150 KV GARDU INDUK BANTUL

Ganis Aisyiah Purwaningsih^{1*}, Rohjai Badarudin²

^{1,2}Departemen Teknik Elektro dan Elektronika, Fakultas Vokasi,
Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

ABSTRACT

Circuit Breaker (CB) atau PMT kependekan dari Pemutus Tenaga merupakan suatu alat yang dirancang guna melakukan pemutusan aliran arus listrik pada saat terjadi situasi beban. Tujuan dari penelitian ini yaitu guna menilai efektivitas pemutus arus pada saat terjadi gangguan dan mengkaji variabel-variabel yang mempengaruhi kinerjanya di Gardu Induk Bantul. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemutus arus pada 150 kV Gardu Induk Bantul mempunyai kinerja yang baik dan masuk dalam kategori “baik”. Evaluasi tersebut didasarkan pada konfigurasi temporal relai arus lebih yang ditempatkan pada penyulang 20 kV di Gardu Induk Bantul, dengan ambang batas minimal 0,3 detik. Pilihan ini diambil guna memitigasi seringnya terjadinya gangguan rangkaian akibat lonjakan arus listrik secara tiba-tiba dari trafo yang sudah terhubung dengan jaringan lain. Kinerja suatu pemutus arus atau PMT dipengaruhi oleh ukuran dari arus gangguan short circuit. Arus ini berbanding terbalik dengan rentang dari posisi gangguan; seiring bertambahnya jarak, arus berkurang, dan sebaliknya. Selain itu, pengaturan rele arus lebih juga mempunyai pengaruh yang cukup besar. Kinerja optimal relai dicapai ketika relai segera bereaksi terhadap perintah untuk memutuskan jaringan dengan mengaktifkan pemutus arus atau PMT.

Kata Kunci: gardu induk; *circuit breaker*; relai arus lebih

ABSTRACT

Circuit Breaker (CB) or PMT short for Power Breaker, is a device designed to interrupt the flow of electric current when a load situation occurs. The aim of this research is to assess the effectiveness of circuit breakers when a disturbance occurs and examine the variables that influence their performance at the Bantul Main Substation. The research results show that the circuit breakers at the 150 kV Bantul Main Substation have good performance and are in the "good" category. This evaluation is based on the temporal configuration of the overcurrent relay placed on the 20 kV feeder at the Bantul Main Substation, with a minimum threshold of 0.3 seconds. This choice was taken to mitigate frequent circuit disruptions due to sudden surges in electric current from transformers that are connected to other networks. The performance of a circuit breaker, or PMT, is influenced by the size of the short-circuit fault current. This current is inversely proportional to the range of the fault position; as distance increases, current decreases, and vice versa. Apart from that, the overcurrent relay settings also have quite a big influence. Optimal relay performance is achieved when the relay immediately reacts to a command to disconnect the network by activating the circuit breaker, or PMT.

Keywords: *substation, circuit breakers, over current relay*

1. PENDAHULUAN

Pusat pembangkit listrik biasanya terhubung dalam jaringan transmisi udara yang mengalirkan arus listrik dari pusat pembangkit ke titik pemakaian utama, seperti gardu induk (GI) [1]. Gardu induk beroperasi pada tegangan tinggi 150 kV memiliki peran sentral dalam mendistribusikan dan mengelola energi listrik dalam sistem tenaga listrik.

Tegangan 150 kV dipilih karena merupakan titik tengah antara gardu distribusi dan gardu transmisi, memungkinkan efisiensi dalam transfer daya antar berbagai tingkat tegangan. sistem transmisi bertugas mentransfer pemindahan daya listrik dari pembangkit ke jaringan distribusi yang bertugas menyuplai energi listrik kepada pelanggan [2]. Dalam Gardu Induk 150 kV juga memiliki komponen utama yang berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik di kenal sebagai CB.

Berlandaskan International Electrotechnical Vocabulary atau disingkat IEC 441-14-20, PMT atau Pemutus Tenaga atau CB atau kependeka dari Circuit Breaker adalah salah satu jenis peralatan mekanis yang digunakan untuk mengalihkan rangkaian listrik. Ini dirancang untuk menangani aliran arus normal, serta untuk menutup, memungkinkan aliran arus, serta melakukan pemutusan arus beban. Pada keadaan tidak normal, serupa dengan waktu ketika terjadinya arus pendek, pemutus arus mampu memutus arus beban dalam jangka waktu tertentu [3]. Circuit breaker pada gardu induk digunakan untuk mengatur aliran listrik dalam berbagai kondisi, baik saat terjadi gangguan arus hubung singkat ataupun dalam keadaan normal dan pada tegangan yang tidak normal [4]. untuk memutus aliran listrik dalam kondisi darurat, seperti gangguan atau kelebihan beban yang dapat merusak peralatan dan infrastruktur. PMT memiliki dua kemampuan utama dalam menanggapi arus hubung singkat yang melebihi nilai nominal, baik itu pada konduktor maupun isolator, sehingga memberikan keandalan ekstra dalam menjaga integritas system [5].

Memperhatikan pentingnya circuit breaker dalam keandalan Gardu Induk, analisis kinerja menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa komponen ini beroperasi dengan optimal dan memenuhi standar keamanan serta performa yang dibutuhkan dalam distribusi energi listrik

2. METODE PENELITIAN

Penelitian diselenggarakan di PT.PLN (Persero) Gardu Induk Bantul yang beralamat di Jalan Parangtritis Nomer 4, Km. 5, Druwo, Bangunharjo, Kec, Kabupaten Bantul, DIY 55188, mulai tanggal 1 Desember 2023 sampai dengan 12 Januari 2024. *Flowchart* penelitian yakni ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Flowchart* Penelitian

A. Arus Gangguan Hubung Singkat

Hubungan singkat yaitu gangguan listrik yang timbul sebab berkurangnya efektivitas isolasi primer antara garis fasa atau diantara garis fasa dan tanah. Hal ini pun disebut bagai loncatan arus lebih atau kendala arus lebih. [6].

Arus gangguan diperhitungkan memakai rumus dasar. Perhitungan ini memerlukan penggunaan impedansi ekuivalen yang sesuai dengan jenis gangguan tersebut, baik itu korsleting dua fasa, tiga fasa, atau satu fasa mengarah ke tanah. Hal ini menyebabkan rumus yang dipakai dalam mengkalkulasi arus short circuit berbeda tergantung pada jenis gangguan yang terjadi [7].

B. Impedansi

Untuk mengkalkulasikan arus gangguan hubung singkat, perihal utama yaitu kita harus melakukan perhitungan impedansi sumber, diikuti dengan menentukan impedansi transformator daya, dan kemudian menentukan impedansi penyulang. [8]. Dalam analisis impedansi sistem tenaga listrik, ada 3 jenis impedansi urutan yang dihitung: Z_2 yakni Impedansi urutan negatif, Z_1 yakni Impedansi urutan positif, serta Z_0 yakni Impedansi

urutan nol. Z1 menggambarkan impedansi yang cuma berpengaruh terhadap arus urutan positif, sedangkan Z2 mengacu pada impedansi yang sekadar memengaruhi arus urutan negatif. Sementara itu, Z0 yaitu impedansi yang mempengaruhi arus urutan nol [9].

C. Impedansi Sumber

Impedansi Sumber bisa diperhitungkan serta memanfaatkan persamaan sebagai berikut [10].

$$X_s = \frac{\text{Tegangan Sisi Primer Transformator (kV}^2\text{)}}{\text{Daya Hubung Singkat Bus 150 kV (MVA)}} \quad (1)$$

Keterangan:

Tegangan sisi primer transformator (kV)

Impedansi Sumber (Ohm) = X_s

Daya short circuit di bus 150 kV (MVA)

D. Impedansi Transformator

Impedansi suatu transformator sebagian besar ditentukan oleh reaktansinya, sedangkan resistansi tidak begitu penting karena nilainya yang relatif kecil. Berikut tahapan-tahapan yang bisa dipergunakan guna melakukan pencarian nilai reaktansi transformator dalam satuan Ohm [11]. Memperoleh nilai ohm pada 100% guna transformator di sisi 20 kV

$$X_t \text{ (pada 100\%)} = \frac{\text{Tegangan Transformator Daya 1 (sisi 20kV}^2\text{)}}{\text{Daya Transformator Daya 1}} \quad (2) [11]$$

Keterangan:

Tegangan sisi primer transformator (kV)

Impedansi Transformator (Ohm) = X_t

Daya Transformator Daya 1 (MVA)

E. Mengatur Relai Arus Lebih

Sebelum memasang sekunder transformator daya serta relai arus lebih di sisi utama, penting untuk menghitung nilai arus nominal transformator. Menghitung parameter rele arus lebih, baik sisi utama ataupun sisi sekunder, sebagai berikut [1].

$$I \text{ set (primer)} = 1,05 \times I_{(\text{Nominal Transformator})} \quad (3)$$

Nilai yang disebutkan adalah nilai pada sisi primer. Guna memperoleh nilai yang sesuai untuk pengaturan relai arus lebih pada sisi sekunder, perlu dikalkulasi dengan mempertimbangkan rasio dari CT atau transformator arus yang terkait baik pada sisi primer ataupun sekunder transformator tenaga.

$$I \text{ set (Sekunder)} = I \text{ set (Primer)} \times \frac{1}{\text{Ratio CT}} \quad (4)$$

F. Setting Waktu

Waktu tunda dalam relai ini berubah secara terbalik seiring dengan arusnya: semakin tinggi arusnya, semakin singkat waktu tundanya. Setiap pabrik memiliki kebebasan untuk menciptakan karakteristiknya sendiri, mulai dari *Standar Inverse* hingga *Long Time Inverse*, memungkinkan variasi yang berbeda dalam responsnya terhadap arus yang mengalir [12]. Tabel 1 menunjukkan nilai karakteristik Relai arus Waktu Terbalik

Tabel 1. Karakteristik Relai Arus waktu Terbalik

Karakteristik	K	α
<i>Very Inverse</i>	13,5	1,0
<i>Standar Inverse</i>	0,14	0,02
<i>Long Time Inverse</i>	120,0	1,0
<i>Extreemely Inverse</i>	80,0	2,0

Menghitung arus gangguan dari korsleting, nilai tersebut dijadikan acuan guna menetapkan Time Multiplier Setting (TMS) [13]. Persamaan yang digunakan guna memastikan nilai setelan waktu bervariasi sejalan dengan desain pabrik yang membuat relai tersebut [14]. Tabel 2 menunjukkan karakteristik operasi relai inverse.

Tabel 2 . Karakteristik Operasi Waktu *Relai Inverse*

Tipe Relai	Setting Waktu (TMS)
<i>Standar Inverse</i>	$tms = \frac{0.14 \times t}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{Set}}\right)^{0,02} - 1}$
<i>Very Inverse</i>	$tms = \frac{13,5 \times t}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right) - 1}$
<i>Extreemely Inverse</i>	$tms = \frac{80 \times t}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{Set}}\right)^2 - 1}$
<i>Long Time Inverse</i>	$tms = \frac{120 \times t}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{set}}\right) - 1}$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Data Komponen Gardu Induk

1) Transformator 1

- a. Merek = Xian / SFZ-6000/150
- b. Daya = 36/60 MVA

- c. Tegangan = 20/150 kV
- d. Impedansi = 12,35 %
- e. Arus Nominal = 1732 A
- f. Hubungan belitan Transformator = Yn yn0 (d)
- g. Rn (Tahanan Pentanahan) = 0,3 Ohm

2) Relai arus lebih penyulang 20kV

- a. Merek = SIEMENS
- b. Arus Nominal = 5 A
- c. Rasio CT = 800/5
- d. Karakteristik = Standard inverse
- e. Tms = 0,25s

3) Penghantar Penyulang BNL 1 Transformator 1

- a. Jenis Penghantar = AAAC (A3C)
- b. Panjang Jaringan = 5,7 Km
- c. Diameter Penghantar = 240 mm²
- d. Impedansi Urutan Nol = 0,2824 + j 1,6033
- e. Impedansi Urutan Negatif/Positif = 0,1334 + j 0,3158

B. Perhitungan dan Analisis Data

1) Korsleting

Ada tiga jenis gangguan yang mungkin berlangsung pada sistem listrik jaringan: korsleting satu, dua, serta tiga fasa ke tanah. Data korsleting yang tercatat pada bus 150 kV GI Bantul sebesar 4156,92 MVAsc.

Penyusunan kalkulasi arus gangguan dari short circuit didasarkan pada panjang jalur sebaran, dengan diasumsikan terjadinya pada 25%, 50%, 75%, serta 100% panjang total jalur sebaran yang tersedia.

2) Impedansi Sumber

Selepas didapatkan nilai (MVASC), kemudian nilai impedansi sumber sisi primer 150kV bisa dihitung menggunakan persamaan rumus dibawah ini.

$$X_{s(150kV)} = \frac{150kV^2}{4156,92} = 5,14\Omega$$

Impedansi di sisi sekunder,

$$X_{s(20kV)} = \frac{20kV^2}{4156,92} = 0,097\Omega$$

3) Reaktansi Trafo

Berdasarkan data dan spesifikasi sebelumnya, transformator 1 di Gardu Induk Bantul 150 kV memiliki impedansi sebesar 12,35% .Dengan menggunakan nilai impedansi ini, kita dapat menghitung reaktansi urutan negatif, positif, serta nol. Namun, sebelumnya, kita perlu menentukan nilai dalam ohm pada 100% menggunakan rumus di bawah ini sebagai langkah awal.

$$X_{t(100\%)} = \frac{20kV^2}{60} = 6,67 \Omega$$

Nilai reaktansi urutan transformator tenaga dengan reaktansi urutan negatif serta positif $X_{t1} = X_{t2}$, maka

$$X_{t1} = X_{t2} = 12,35\% \times 6,67 \Omega = 0,8237\Omega$$

Berdasarkan data dan spesifikasi alat, transformator 1 memiliki *vector group* YN yn0 (d) yang berarti dalam transformator itu tak ada belitan delta di dalamnya hingga reaktansi urutan nol diasumsikan berkisar antara 9 sampai dengan 14 kemudian di kalikan dengan X_{t1} dalam perhitungan ini diambil nilai sebagai berikut.

$$X_{t0} = 10 \times X_{t1} = 10 \times 0,8237 \Omega = 8,237 \Omega$$

4) Impedansi Penyulang

Berdasarkan data yang didapat penyulang BNL 1 Gardu Induk Bantul 150kV menggunakan satu jenis penghantar yaitu AAAC dengan diameter 240mm² dengan panjang jaringan sejauh 5,7 Km, maka impedansi penyulang dapat diperhitungkan sebagai berikut.

$$Z_1 = Z_2 (A3C 240) = (0,1344 + j 0,3158) \Omega/Km \times 5,7 Km = (0,766 + j 1,80 \Omega)$$

$$Z_0 (A3C 240) = (0,2824 + j 1,6033) \Omega/Km \times 5,7 Km = (1,609 + j 9,1388 \Omega)$$

Dengan seperti itu nilai impedansi penyulang bagi lokasi gangguan bersama asumsi jarak 100%, 75%, 50%, 25%, serta 0% panjang penyulang, guna yang disebutkan.

$$Z_1 \& Z_2 = (A3C 240) \times \% \text{ jarak gangguan}$$

1). Urutan Positif & Negatif

Tabel 3. Impedansi Penyulang Urutan Positif serta Negatif

Panjang jaringan (%)	Impedansi ekuivalen ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$)
0	$0 + j 0,9207$
25	$0,1915 + j 1,3707$
50	$0,383 + j 1,8207$
75	$0,574 + j 2,2707$
100	$0,766 + 2,7207$

2). Urutan Nol

Nilai Urutan Nol dari impedansi pengumpan bisa ditentukan dengan memanfaatkan persamaan.

$$Z_0 = Z_0(A3C 240) \times \% \text{ jarak gangguan} \tag{6}$$

5) Perhitungan Korsleting 1 Fasa Tanah

Gangguan ini bisa dikalkulasikan dengan memanfaatkan persamaan 7.

$$I = \frac{V}{Z} \tag{7}$$

Keterangan:

Z = Impedansi ($Z_1 + Z_2 + Z_0$) ekuivalen

$V = 3 \times$ Tegangan Fasa-Netral

Tabel 4. Ar Korsleting 1 Fasa ke tanah

Panjang (%)	Korsleting 1 Fasa ke Tanah (A)
0	3155,4
25	2317,4
50	1831,1
75	1513,5
100	1289,7

6) Kalkulasi Korsleting Fasa ke Fasa

Tiang .distribusi dan transmisi yang yang mempunyai kaki tiang tinggi dapat memicu terjadinya korelasi singkat 2 fasa [15]. Perhitungan Korsleting 2 fasa bisa ditetapkan dengan memakai persamaan 7.

$$I = \frac{V}{Z} \tag{7}$$

Yakni :

$Z = \text{Impedansi } (Z_1 + Z_2) \text{ ekuivalen}$

$V = 3 \times \text{Tegangan Fasa-Netral}$

Tabel 5. Arus Korsleting Fasa ke Fasa

Panjang (%)	Arus Korsleting Fasa ke Fasa (A)
0	10861,3
25	6401,2
50	4537,8
75	3514,7
100	2868,1

7) Perhitungan Korsleting Singkat 3 Fasa

Hubungan pendek tiga fasa yaitu gangguan yang berlangsung sebab penyambungan ketiga kabel tiga fasa secara bersamaan [16]. Short circuit yang besar pada sistem kelistrikan tiga fasa bisa ditentukan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$I = \frac{V}{Z} \tag{9}$$

Keterangan:

$Z = \text{Impedansi } (Z_1) \text{ ekuivalen}$

$V = \text{Tegangan Fasa-Netral}$

Tabel 6. Korsleting 3 Fasa

Panjang (%)	Korsleting 3 Fasa (A)
0	12541,5
25	7391,5
50	5239,8
75	4058,4
100	3311,7

8) Analisa Korsleting

Kalkulasi korsleting akibat cacat short circuit sangat terkait dengan lokasi atau titik tertentu di mana gangguan terjadi. Ketika impedansi meningkat, arus hubung singkat berkurang. Sebaliknya, ketika jarak dari gangguan berkurang, impedansi saluran berkurang dan arus hubung singkat meningkat [17]. Saat menganalisis gangguan fasa, besaran korsleting paling tinggi adalah arus yang berlangsung pada situasi tiga fasa.

9) Perhitungan Setting Relai

a. Mengatur relai arus lebih penyulang 20 kV

Pengaturan relai pada sisi penyulang diatur oleh arus beban paling tinggi dan rasio penyulang. Rele dengan karakteristik standar *inverse* biasanya di setting dengan skala 1,05 hingga $1,1 \times I_{load maks}$.

Persyaratan lain adalah *setting* waktu kerja ditetapkan sesuai dengan selisih waktu antar alat proteksi yakni 0,3 – 0,5 detik. Tujuannya adalah untuk mencegah terjadinya efek arus *inrush* saat tegangan mulai diisi kembali setelah terjadinya trip [18].

Arus beban 480 Amp, Ratio CT 800/5 Amp

$$I_{SET primer} = 1,1 \times I_{load} = 1,1 \times 480 = 528 A$$

$$I_{SET sekunder} = I_{SET primer} \times \frac{1}{CT} = 528 A \times \frac{1}{\frac{800}{5}} A = 3,3 A$$

Nilai TMS yang akan dilakukan setting pada OCR (atau kependekan dari *Over Current Relay*) yakni memakai rumus 12 [19].

$$t = \frac{0,14 \times tms}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{Set primer}}\right)^{0,02} - 1} \quad (12)$$

$$0,3 = \frac{0,14 \times tms}{\left(\frac{I_{fault} (I_{sc \ 3 \ \phi} \text{ titik } 0\%)}{I_{Set primer}}\right)^{0,02} - 1}$$

$$tms = \frac{0,14 \times tms}{\left(\frac{12541,5}{528}\right)^{0,02} - 1} = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{12541,5}{528}\right)^{0,02} - 1\right)}{0,14} = 0,1401 \text{ detik}$$

b. Mengatur relai korsleting tanah penyulang 20 kV

Mengatur arus relai ini memakai pedoman yang menetapkan nilai 10% untuk arus gangguan tanah paling kecil pada penyulang sebagai pengaturannya. Tujuannya adalah untuk mengakomodasi tahanan dari busur gangguan.

$$I_{SET primer} = 10\% \times 1289,7 A = 128,97 A$$

$$I_{SET sekunder} = 128,97 A \times \frac{1}{\frac{800}{5}} A = 0,806 A$$

Nilai TMS yang hendak dilakukan setting pada OCR yakni memakai rumus: [19].

$$t = \frac{0,14 \times tms}{\left(\frac{I_{fault}}{I_{Set primer}}\right)^{0,02} - 1}$$

$$0,3 = \frac{0,14 \times tms}{\left(\frac{I_{fault} (I_{sc \ 1 \ \phi - N} \text{ titik } 0\%)}{I_{Set primer}}\right)^{0,02} - 1}$$

$$tms = \frac{0,14 \times tms}{\left(\frac{8155,4}{128,97}\right)^{0,02} - 1} = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{8155,4}{128,97}\right)^{0,02} - 1\right)}{0,14} = 0,1415 \text{ detik}$$

c. Pemeriksa waktu kerja relai

Waktu kerja relai untuk arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 7. Waktu Kerja Relai Gangguan 1 Fasa ke Tanah

Panjang (%)	Waktu Kerja Relai (s)
0	0,29
25	0,33
50	0,36
75	0,39
100	0,42

Waktu kerja relai untuk arus gangguan fasa ke fasa ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Waktu Kerja Gangguan Fasa ke Fasa

Panjang (%)	Waktu Kerja Relai (s)
0	0,31
25	0,38
50	0,44
75	0,507
100	0,4

Waktu kerja relai untuk arus gangguan 3 fasa ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Waktu Kerja Gangguan Korsleting 3 Fasa

Panjang (%)	Waktu Kerja Relai (s)
0	0,31
25	0,38
50	0,44
75	0,507
100	0,4

10) Analisis Waktu Kerja Relai

Didasarkan pada perbandingan antara persyaratan waktu minimum yang tidak diperbolehkan kurang dari 0,3 detik dengan Tabel 7, 8, dan 9, analisis menunjukkan bahwa hasil perhitungan waktu *relatif* sesuai atau memiliki perbedaan yang tidak *signifikan*. Ini

menyiratkan bahwa pengaturan arus relai yang terpasang lapangan telah optimal. Penyesuaian nilai ke relai patut mempertimbangkan tap yang ada pada relai yang diterapkan, oleh karena itu, hasilnya tidak akan secara identik sesuai dengan perhitungan. Dengan pengaturan relai yang baik, kinerja pemutus sirkuit atau PMT juga dinilai baik karena hubungan yang erat antara relai dan PMT. Relai memberikan indikasi kepada PMT ketika gangguan terjadi, memungkinkan PMT untuk memutuskan sirkuit yang terkena gangguan sekaligus bertindak sebagai perangkat pelindung pada sirkuit tersebut.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis menegaskan bahwa prinsip kerja circuit breaker di Gardu Induk Bantul melibatkan relai yang mengidentifikasi arus gangguan melalui pertolongan transformator arus. Ketika arus melampaui nilai relai, circuit breaker atau PMT hendak berfungsi untuk menonaktifkan koneksi kelistrikan. Dari hasil perhitungan, kinerja circuit breaker 150 kV di Gardu Induk Bantul dinilai baik karena pengaturan waktu kerja relai arus lebih tidak kurang dari 0,3 detik. Temuan perhitungan memperlihatkan ternyata durasi operasi relai bagi gangguan arus hubung singkat yang disebabkan oleh panjang penyulang berbeda secara konsisten lebih dari 0,3 detik. Kinerja pemutus sirkuit dipengaruhi oleh besarnya arus gangguan, yang sebagian besar ditentukan dari jarak gangguan. makin menjauh jarak gangguan, makin berkurang arus gangguan, berlaku pula untuk yang sebaliknya. Selanjutnya kinerja sistem dipengaruhi oleh setting rele arus lebih. Kecepatan yang lebih tinggi saat relai memerintahkan pemutus sirkuit untuk memutuskan jaringan akan menghasilkan peningkatan kinerja

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Manihuruk, T. Simorangkir, and N. L. Sitanggang, "Studi Kapabilitas Arrester Guna Pengaman Transformator Pada Gardu Induk Tanjung Morawa 150 KV," *Jurnal ELPOTecs*, vol. 4, no. 1, 2021, doi: 10.51622/elpotecs.v4i1.447.
- [2] M. Daneshvar, B. Mohammadi-ivatloo, and K. Zare, "Integration of Distributed Energy Resources Under the Transactive Energy Structure in the Future Smart Distribution Networks," in *Operation of Distributed Energy Resources in Smart Distribution Networks*, 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-814891-4.00014-X.

- [3] P. P. Persero, *Pedoman Pemeliharaan Peralatan Penyaluran Tenaga Listrik PT PLN (Persero) di Regional Jawa Madura Bali*. 2022.
- [4] S. Qi, S. Chang, and L. Cao, “Transient discharge characteristics of insulator short-circuit under high voltage,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, no. 6, pp. 5175–5181, 2021.
- [5] Yusniati, E. Sahnur Nasution, and R. Indra Pangestu, “ANALISIS KINERJA CIRCUIT BREAKER PADA SISI 150 kV GARDU INDUK LAMHOTMA,” *Teknik Elektro*, vol. 2, no. 4, 2019.
- [6] I. Kim, “A calculation method for the short-circuit current contribution of current-control inverter-based distributed generation sources at balanced conditions,” *Electric Power Systems Research*, vol. 190, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106839.
- [7] T. Gonen, *Electric power distribution engineering*. CRC press, 2015.
- [8] A. Azis and I. K. Febrianti, “KAJIAN SISTEM PROTEKSI ARUS LEBIH PADA PENYULANG CENDANA GARDU INDUK BUNGERAN PALEMBANG,” *Jurnal Ampere*, vol. 4, no. 2, 2019, doi: 10.31851/ampere.v4i2.3468.
- [9] L. Maisyarah, “KAJIAN HUBUNG SINGKAT PADA SALURAN UDARA TEGANGAN MENENGAH 20 KV (STUDI KASUS PADA PENYULANG LG 02 PT PLN (PERSERO) RAYON LHOKSEUMAWE) MENGGUNAKAN SOFTWARE ETAP 12.6.0,” *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 8, no. 1, 2019, doi: 10.29103/jee.v8i1.2408.
- [10] A. Azis, “KAJIAN PEMAKAIAN RECLOSER GUNA MEMPROTEKSI ARUS LEBIH PADA JARINGAN DISTRIBUSI DI PT.PLN (Persero) ULP MARIANA GARDU INDUK PRAJIN,” *JURNAL SURYA ENERGY*, vol. 6, no. 1, 2022, doi: 10.32502/jse.v6i1.3097.
- [11] W. D. Stevenson and D. William, “Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat,” *Erlangga, Jakarta*, 1993.
- [12] C. Rizal and A. Azis, “Kajian Setting Relai Arus Lebih (OCR) Serta Relai Gangguan Tanah (GFR) Pada Penyulang Gurami Gardu Induk Sungai Kedukan Palembang,” *Jurnal Ampere*, vol. 7, no. 1, pp. 49–62, 2022.
- [13] British Standard, “Electrical protection relay. Requirements for the families of protection relays. Specification for thermal electrical relays,” *London: British Standard Institution*, 1991.

- [14] A. A. , & U. S. T. Aziis, “Kajian Sistem Proteksi PMT dengan Relay CB (Circuit Breaker) di Gardu Induk 150kV Gondangrejo (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta),” 2019.
- [15] G. Forstner, A. Kugi, and W. Kemmetmüller, “Fault-tolerant torque control of a three-phase permanent magnet synchronous motor with inter-turn winding short circuit,” *Control Eng Pract*, vol. 113, 2021, doi: 10.1016/j.conengprac.2021.104846.
- [16] Hendriyadi, “Perhitungan Arus Gangguan Hubung Singkat Pada Jaringan Distribusi Di Kota Pontianak (Doctoral dissertation, Tanjungpura University).,” 2017.
- [17] J. L. Blackburn and T. J. Domin, *Protective relaying: principles and applications*. CRC press, 2006.
- [18] I. of E. and E. Engineers, *Ieee recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems*. Ieee, 2001.
- [19] I. Baskara, I. W. Sukerayasa, and W. G. Ariastina, “Studi Koordinasi Peralatan Proteksi OCR serta GFR pada Penyulang Tibubeneng,” *Teknik Elektro*, vol. 14, no. 2, 2015.