

Evaluasi sistem proteksi penyulang kalingga pada gardu induk New Jakabaring yang melayani pelanggan premium

Anton Firmansyah¹, Muhammad Noer², Ihsan Jihadi Putra³

anton_firmansyah@polsri.ac.id, mnjphiliang@gmail.com, ikhsanjp92@gmail.com

^{1,2,3}Program Studi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 24 Januari 2022

Direvisi 15 April 2022

Diterbitkan 29 April 2022

Kata kunci:

GI New Jakabaring
Koordinasi Relay
Relay Arus Lebih
Relay Gangguan Tanah
Kalingga

Keywords:

New Jakabaring Substation
relay coordination
Over Current Relay
Ground Fault Relay
Kalingga

ABSTRAK

Politeknik Pariwisata Palembang dan Bowling Jakabaring Sport City merupakan pelanggan premium PT. PLN (Persero) UP3 Palembang. Sebagai pelanggan premium seharusnya pelanggan ini mendapatkan keandalan jaringan listrik. Awalnya Politeknik Pariwisata Palembang termasuk kawasan *Zero Down Time* untuk mengamankan suplai kelistrikan Jakabaring Sport City pada perhelatan Asian Games tahun 2018. Setelah berakhirnya Asian Games 2018, beban trafo daya#2 di Gardu Induk New Jakabaring turun dibawah 50%. Untuk membebani trafo tersebut PT. PLN (persero) UP3 Palembang menambahkan jaringan existing pada Gardu Hubung tersebut. Perubahan konfigurasi distribusi listrik ini harusnya diimbangi dengan koordinasi proteksi yang tepat agar dapat menjaga keandalan suplai listrik, namun kenyataannya dilapangan berbeda, terhitung sejak bulan April 2019, penyulang Kalingga sudah mengalami 88 kali padam dengan rata-rata padam 656 menit. Untuk menyelesaikan permasalahan tersebut dilakukan penelitian dengan menggunakan metode studi kasus, data penunjang seperti data primer yang didapat dari kondisi nyata dilapangan, data sekunder seperti data gangguan pada penyulang, studi literatur dari buku penunjang serta jurnal dan laporan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dan sumber-sumber yang menunjang untuk penelitian. Berdasarkan perhitungan diperoleh nilai *setting relay* untuk nilai arus lebih karakteristik *standar inverse* pada GH Poltekpar adalah 299,2A (primer)/4,98A (sekunder), *setting TMS* untuk *relay* arus lebih pada proteksi terjauh 0,499 dan TMS pada *relay* GFR 0,034. GH Bowling 299,2 A (primer) dan 4,48 A (sekunder), *setting TMS* untuk *relay* arus lebih 0,199 dan TMS pada *relay* GFR 0,134. Pada penyulang outgoing 20 kV 393,8 A (primer)/3,281A (sekunder), *setting TMS relay* arus lebih pada outgoing Penyulang Kalingga 0,319 dan TMS untuk *relay* gangguan tanah 0,232. Nilai *setting relay* arus lebih pada incoming trafo 20 kV adalah 1905 A (primer)/0,9252 A (sekunder), TMS untuk sisi incoming Penyulang Kalingga adalah 0,248 dan TMS untuk *relay* gangguan tanah adalah 0,33.

ABSTRACT

Politeknik Pariwisata Palembang and Bowling Jakabaring Sport City is a premium customer of PT. PLN (Persero) UP3 Palembang. As premium customers, both of these customers should get the reliability of the power grid. After the end of the 2018 Asian Games, the load on the power-2 transformer at the New Jakabaring Substation fell below 50%. To overload the transformer, PT. PLN (Persero) UP3 Palembang added the existing network to the substation. This change in the electricity distribution configuration should be balanced with proper coordination of protection in order to maintain the reliability of the electricity supply, but the reality in the field is different, as of April 2019, the Kalingga feeder has experienced 88 blackouts with an average of 656 minutes. To solve these problems, research is carried out using case study methods, supporting data such as primary data obtained from real conditions in the field, secondary data such as disturbance data and literature studies from supporting books as well as journals and research reports that have been carried out previously and other sources. Support for research. Based on the calculation, the relay setting value for the standard inverse characteristic overcurrent value at the Poltekpar GH is 299.2 A (primary)/4.98 A (secondary), the TMS setting for the overcurrent relay at the farthest protection is 0.499 and the TMS is 0.034 for the GFR relay. GH Bowling 299.2

A (primary) and 4.48 A (secondary), setting TMS for 0.199 overcurrent relay and TMS on 0.134 GFR relay. For the outgoing feeder 20 kV 393.8 A (primary)/3,281A (secondary), the TMS setting for the overcurrent relay is 0.319 for the outgoing feeder, and the TMS for the ground fault relay is 0.232. The overcurrent relay setting value for the incoming 20 kV transformer is 1905 A (primary)/0.9252 A (secondary), the TMS for the incoming Kalingga feeder is 0.248 and the TMS for the ground fault relay is 0.33.

Penulis Korespondensi:

Anton Firmansyah,
Jurusan Teknik Elektro,
Program Studi Teknik Listrik,
Politeknik Negeri Sriwijaya,
Jl. Srijaya Negara Bukit Besar, Palembang, Indonesia.
Email: anton_firmansyah@polsri.ac.id

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan listrik yang terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi dan ilmu pengetahuan. Perjalanan listrik yang sangat panjang untuk bisa sampai ke pemakai atau konsumen dari tempat pembangkitannya. Penyaluran tenaga listrik dari PT. PLN (Persero) sebagai penyedia tenaga listrik ke pelanggan melalui jaringan distribusi tegangan menengah maupun distribusi jaringan tegangan rendah. Jaringan distribusi tenaga listrik dimulai dari gardu induk kemudian disalurkan melalui saluran udara atau saluran kabel tanah ke pelanggan. Dalam pendistribusian tenaga listrik beberapa sistem jaringan distribusi membentuk suatu pola jaringan, antara lain pola *radial* dan pola *loop*[1,2].

Dalam menjalankan bisnis kelistrikan PT. PLN (Persero) membagi proses bisnisnya menjadi tiga bagian utama, yaitu pembangkitan, penyaluran (Transmisi & Gardu Induk), serta distribusi yang merupakan bagian akhir dari rangkaian proses ketenagalistrikan[3]. Listrik dari pembangkit akan dinaikkan tegangannya oleh gardu induk untuk mengurangi rugi-rugi pada sisi transmisi, dan sebelum sampai kekonsumen tegangannya akan diturunkan lagi oleh gardu-gardu distribusi sesuai dengan nilai tegangan yang diizinkan. Karena banyaknya beban yang disuplai oleh pembangkit, maka dibuatlah penyulang-penyulang yang berfungsi untuk mengirim listrik ke pemakai atau konsumen. Setiap penyulang menggunakan sistem proteksi yang saling terkoordinasi untuk memberikan pelayanan listrik yang aman dan handal. Salah satu sistem proteksi adalah relay arus lebih yang digunakan pada penyulang. Karena sifat gangguan hubung singkat yang dapat menyebar ke daerah yang tidak mengalami gangguan, maka dari itu dibutuhkan setting relay arus lebih yang terkoordinasi dengan relay pada penyulang terdekat[4].

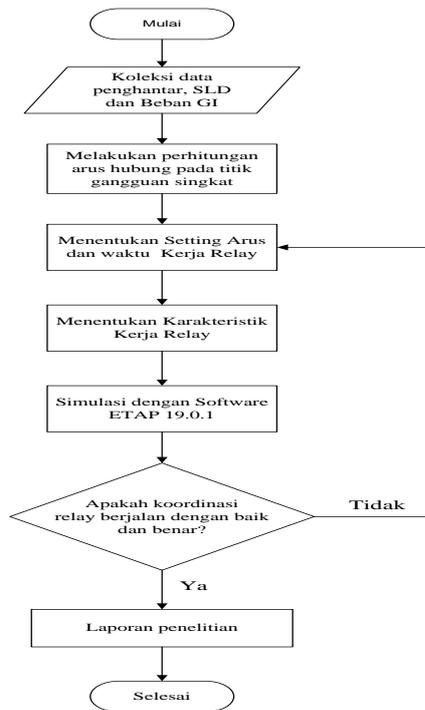
Sistem proteksi yang digunakan pada penyulang-penyulang harus mampu melindungi dan menghindari peralatan dari gangguan atau kerusakan. Sistem proteksi ini memiliki respon yang cepat, selektif dan handal ketika terjadi gangguan, sehingga terjadinya gangguan dapat dihindari, dan jika gangguan tidak bisa dihindari maka sistem proteksi mampu untuk melokalisir gangguan agar tidak menyebar ke daerah yang tidak mengalami gangguan[5]. Relay arus lebih sebagai sistem proteksi yang digunakan pada penyulang-penyulang bekerja berdasarkan perbandingan nilai yang masuk ke dalam relay dan nilai setting yang sudah dihitung. Nilai arus yang masuk ke dalam relay adalah arus yang sudah diturunkan menggunakan *current transformer* (CT) sampai kepada nilai arus yang dapat dihitung oleh relay. Nilai arus hasil dari *current transformer* akan dibandingkan oleh relay, jika nilai arus gangguan melebihi nilai setting pada relay maka, relay akan memerintahkan circuit breaker (CB) untuk bekerja agar gangguan yang terjadi bisa segera dihentikan. Namun, jika relay tidak dapat menghentikan gangguan maka, relay lain (relay backup) pada penyulang terdekat harus segera bekerja untuk menghentikan gangguan. Nilai setting arus lebih yang terkoordinasi bergantung dari nilai *time dial setting* (TDS) dan nilai arus pickup (I_p)[6].

Sebelum menggunakan relay arus lebih pada penyulang, terlebih dahulu harus dilakukan perhitungan setting relay arus lebih yang terkoordinasi.. untuk menghindari durasi dan frekuensi padam pelanggan atau *System Average Interruption Duration Index* (SAIDI) dan *System Average Interruption Frequency Index* (SAIFI) diperlukan setting *relay* yang baik sebagai bagian dari sistem proteksi agar bisa melokalisir letak gangguan. Agar syarat-syarat dari sistem proteksi terpenuhi seperti sensitivitas dan selektif dalam melokalisir letak gangguan, maka sistem proteksi pada jaringan distribusi tersebut harus direncanakan dan dievaluasi.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi kasus, dengan mengumpulkan data primer berupa data penyulang yang akan diteliti, data sekunder berupa gangguan dan titik gangguan yang terjadi yang

didapatkan dari PT. PLN (Persero) UP3 Palembang, serta data literatur yang mendukung penelitian ini. Dengan menggunakan data primer berupa pengamatan konfigurasi pada wilayah yang dilayani pada setiap penyulang, data sekunder berupa survei data historis pada penyulang, dapat dilakukan perhitungan dan analisa data, membandingkan setting relai arus lebih hasil perhitungan dengan realisasi dilapangan. Data penyulang yang ada PT. PLN (Persero) UP3 Palembang dalam hal ini adalah Penyulang Kalingga pada Gardu Induk New Jakabaring, yang akan dilakukan perhitungan mengenai evaluasi sistem proteksi pada penyulang tersebut. Tahap – tahap dari prosedur penelitian untuk menghasilkan koordinasi *relay* arus lebih yang digunakan digambarkan dalam bentuk diagram alir (*flow chart*) pada gambar 1 berikut ini :



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1 Tahapan Penelitian

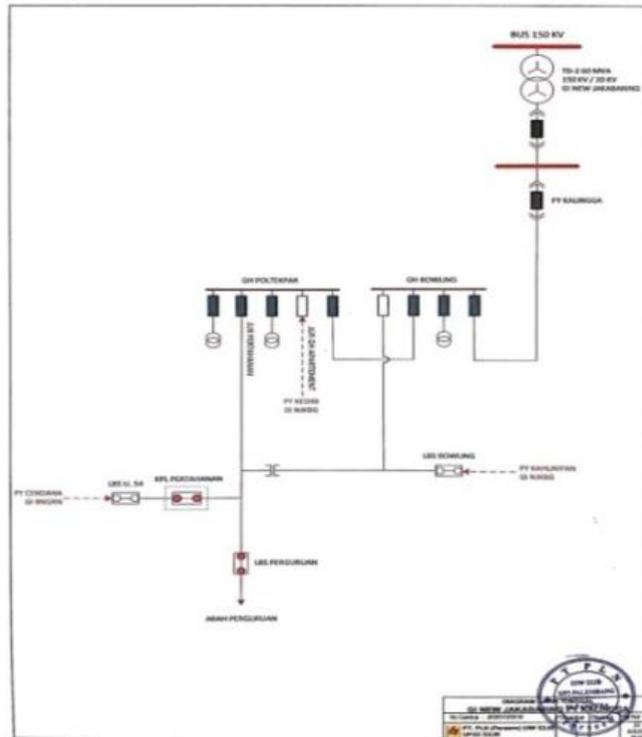
Dalam proses penelitian ini terdapat prosedur yang dilalui secara bertahap antara lain sebagai berikut:

1. Melakukan *setting* arus dan waktu pada *relay* arus lebih.
2. *Setting* arus didasarkan hasil dari perhitungan pada persamaan 13 dan persamaan 14.
3. *Setting* waktu dengan acuan semakin dekat sumber semakin lama dengan grading antar peralatan proteksi 0,3 detik.
4. Melakukan perhitungan arus hubung singkat antar fasa.
5. Melakukan perhitungan arus hubung singkat pada tiap – tiap lokasi gangguan.
6. Melakukan perhitungan koordinasi proteksi berdasarkan arus dan waktu serta karakteristik *relay* (OCR-GFR).
7. Melakukan simulasi koordinasi proteksi dengan software ETAP 19.0.1

Pada penelitian ini dilakukan perhitungan gangguan hubung singkat, koordinasi rele OCR dan GFR serta melihat kurva koordinasi antar relay tersebut. Relay yang digunakan pada perhitungan adalah menggunakan kurva standar invers.

2.2 Diagram Satu garis Penyulang Kalingga

Diagram satu garis penyulang Kalingga ini berisi informasi mengenai komponen-komponen listrik yang terpasang, serta penjelasan lokasi tempat pemasangan komponen listrik tersebut, serta hubungan antar komponen yang ada, berikut ini gambar diagram satu garis GI New Jakabaring.



Gambar 2. Single Line Diagram Penyulang Kalingga

Penelitian ini dilakukan pada Penyulang Kalingga Gardu Induk New Jakabaring dengan transformator TD-2 60 MVA 150 kV/20 kV, sebagai penyulang listrik utama untuk Pelanggan Premium Politeknik Pariwisata dan JSC Bowling Center.

2.3 Data Trafo Tenaga #2 Gardu Induk New Jakabaring

Data transformator Daya yang terpasang di Gardu Induk New Jakabaring untuk melayani pelanggan premium Politeknik Pariwisata dan Bowling Jakabaring Sport City dilihat pada tabel 1 berikut ini :

Tabel 1. Trafo Tenaga# 2 Gardu Induk New Jakabaring

Merk	Unindo
Tegangan Primer	150 kV
Tegangan Sekunder	20 kV
Daya	60 MVA
Frekuensi	50 Hz
Hubungan Belitan	YNyn0+d
Impedansi Transformator %	12,17%
R NGR	40

2.4 Impedansi Penghantar Penyulang Kalingga

Penyulang kalingga menggunakan saluran kabel tegangan menengah menggunakan kabel XLPE dan AAAC yang merupakan jenis kabel yang terdiri dari pilinan kabel berbahan aluminium-magnesium-silikon yang merupakan logam campuran. Kabel AAAC dirancang sebagai kabel yang memiliki konstruksi kuat dan anti karat.

Tabel 2. Impedansi Penyulang Kalingga

Jenis Penghantar	Luas Penampang (mm ²)	Impedansi Urutan Positif dan Negatif (Ω/km)	Impedansi Urutan Nol (Ω/km)
XLPE	300	0,100 + j0,094	0,250 + j0,282
	150	0,206 + j0,104	0,356 + j0,312
A3C	150	0,2162 + j0,3305	0,3631 + j1,6180

2.5 Proteksi GI New Jakabaring

Sebagai pengamanan hubung singkat antar fasa, proteksi yang digunakan tersebut adalah relay arus lebih (*over current relay*) dan sebagai proteksi hubung tanah (*earth fault protection / ground fault protection*) dan relay yang digunakan untuk proteksi ini dikenal dengan nama *earth fault relay* atau *ground fault relay*.

Tabel 3. Proteksi GI New Jakabaring

Lokasi	Merk	Ratio CT	Tipe	Karakteristik
Incoming Trafo GI New Jakabaring	Siemens	2000/1	7SR2203	SI
Outgoing Kalingga	Sepam	300/5	T40	SI
GH Bowling	Sepam	300/5	T40	SI
GH Poltekpar	Sepam	300/5	T40	SI

Berdasarkan singel line diagram yang ditunjukkan pada gambar 2 dapat dilihat apabila terjadi gangguan pada feeder penyulang Kalingga yang terhubung ke GH Bowling, maka pengamanan pada GH bowling tersebut akan bekerja, dengan bekerjanya OCR pada GH Bowling tersebut akan mengakibatkan GH Poltekpar juga akan padam.

2.6 Impedansi Sumber

Untuk menghitung impedansi sumber pada sisi busbar 150 kV diperlukan data hubung singkat pada bus primer trafo dapat menggunakan persamaan sebagai berikut[7]:

$$X_{S (150kV)} = \frac{kV^2}{MVA_{sc}} \tag{1}$$

Impedansi sumber ini masih menggunakan nilai ohm pada sisi 150 kV, karena arus gangguan terjadi pada sisi 20 kV, maka impedansi sumber ini harus dikonversikan terlebih dahulu kedalam sisi 20 kV, dengan menggunakan persamaan:

$$X_{S (20kV)} = \frac{kV(20)^2}{kV(150)^2} X_{S (150kV)} \tag{2}$$

2.7 Reaktansi Transformator

Nilai reaktansi transformator tenaga dapat menggunakan data teknis impedansi transformator yang terdapat di GI New Jakabaring, dengan menggunakan persamaan berikut ini[7]:

$$X_t = \frac{kV^2}{MVA (Trafo)} \tag{3}$$

dimana :

- X_t = Impedansi trafo tenaga (ohm)
- kV² = Tegangan sisi sekunder trafo tenaga (kV)
- MVA = Kapasitas daya trafo tenaga (MVA)

1. Reaktansi Trafo Urutan Positif (X_{t1} = X_{t2}); X_{t1} = X_t (%) x X_t (4)

2. Reaktansi Trafo Urutan Nol (X_{t1} = X_{t2}); X_{t0} = 3 x X_{t1} (5)

Trafo tenaga dengan hubungan belitan Yyn dan tidak mempunyai belitan delta didalamnya, maka besarnya : X_{t0} = (9 s/d 14) x X_{t1} (6)

2.8 Impedansi Penyulang

Pada jaringan distribusi impedansi dihitung per jarak dengan satuan kilometer (ohm/km) yang besarnya berdasarkan luas penampang kabel yang dipakai pada jaringan tersebut[7].

$$Z = R + jX \Omega/km \tag{7}$$

• **Impedansi Ekuivalen**

Perhitungan Impedansi ekuivalen adalah perhitungan impedansi positif (Z_{1eq}), negatif (Z_{2eq}), dan nol (Z_{0eq}) dari titik gangguan sampai ke sumber. Perhitungan Z_{1eq} dan Z_{2eq} langsung dapat menjumlahkan impedansi-impedansi yang ada, sedangkan Z_{0eq} dimulai dari titik gangguan sampai ke Transformator tenaga yang netralnya ditanahkan.

Impedansi Ekuivalen Positif dan Negatif di Outgoing 20 KV
 $Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z \text{ sumber} + Z \text{ trafo} + Z \text{ jaringan}$ (8)

Impedansi Ekuivalen Netral di Outgoing 20 KV
 $Z_{0eq} = Z_{0t} + 3R_{fault} + Z_0 \text{ penyulang}$ (9)

2.9 Arus Gangguan Hubung Singkat

• Arus Hubung Singkat 3 Fasa

Dengan mengetahui besarnya tegangan sumber dan nilai impedansi tiap komponen jaringan serta bentuk konfigurasi didalam sistem maka besarnya arus gangguan hubung singkat dapat dihitung dengan rumus diatas. Sehingga arus gangguan hubung singkat 3 fasa dapat dihitung sebagai berikut dengan persamaan[7]:

$$I_{3\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph}}}{Z_{1\text{eq}}} \quad (10)$$

• Arus Hubung Singkat 2 Fasa

Untuk gangguan fasa ke fasa impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan negatif, sehingga arus gangguan hubung singkat 2 fasa dapat dihitung sebagai berikut dengan persamaan :

$$I_{2\text{fasa}} = \frac{V_{\text{ph-ph}}}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}}} \quad (11)$$

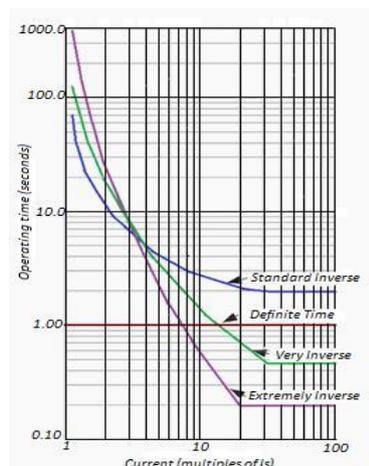
• Arus Hubung Singkat 1 Fasa

Untuk gangguan satu fasa ketanah impedansi yang digunakan adalah impedansi urutan positif. Gangguan tidak simetris menyebabkan arus tidak seimbang dalam sistem, sehingga dibutuhkan komponen simetris untuk perhitungannya sebagaimana uraian di atas. Sehingga arus gangguan hubung singkat 1 Fasa ke tanah dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$I_{1\text{fasa}} = \frac{3 \times V_{\text{ph-n}}}{Z_{1\text{eq}} + Z_{2\text{eq}} + Z_{0\text{eq}}} \quad (12)$$

2.10 Relay Arus Lebih

Relay Arus Lebih atau *Over Current Relay (OCR)* adalah suatu rangkaian peralatan relay pengaman yang memberikan respon terhadap kenaikan arus yang melebihi arus yang telah ditentukan pada rangkaian yang diamankan[8].



Gambar 3. Kurva karakteristik relay dengan waktu tunda[8]

Jenis karakteristik inverse Relay dengan waktu terbalik dapat dibedakan menjadi :

1. Berbanding Terbalik (*Inverse*)
2. Sangat Berbanding Terbalik (*Very Inverse*)
3. Sangat Berbanding Terbalik Sekali (*Extremely Inverse*)
4. Relay Arus Lebih Terbalik dan Terbatas Waktu Minimum (*Inverse Definite Minimum Time / IDMT*)

2.11 Setting Relay Arus Lebih

Berikut ini merupakan parameter yang perlu dicari untuk pemyetelan relay arus lebih :

$$I_s = \frac{K_{fk}}{K_d} I_N \quad (13)$$

Dimana :

I_s = Nilai Arus *Setting*

K_{FK} = Faktor keamanan (*safety factor*) sebesar 1,1 – 1,2

K_d = Faktor arus kembali

- a. nilai KFK definite time sebesar 1,1 – 1,2 dan K_d sebesar 0,8.
- b. nilai KFK inverse time sebesar 1,1 – 1,2 dan K_d sebesar 1,0.

Nilai tersebut adalah nilai primer, untuk mendapatkan nilai setelan sekunder yang dapat disetkan pada OCR, maka harus dihitung dengan menggunakan ratio trafo (CT) yang terpasang pada sisi primer maupun sisi sekunder relay. Arus yang mengalir pada relay dapat ditentukan dengan persamaan:

$$I_{set \text{ sekunder}} = I_s \times \frac{1}{\text{ratio CT}} \text{ (A sekunder)} \tag{14}$$

2.12 Setting Waktu

Pada tabel 1 berikut ini merupakan persamaan untuk perhitungan waktu operasi untuk menentukan nilai kerja waktu (TMS) sesuai standar IEC 60255.

Tabel 4. Setting Waktu (TMS) Berdasarkan Tipe Relay

Tipe Relay	Standar Inverse	Very Inverse	Extremely Inverse	Long Inverse
Setelan Waktu (TMS)	$\left[\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}} \right)^{0,02} - 1 \right) \right] \times t$ 0,14	$\left[\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right) \right] \times t$ 13,5	$\left[\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}} \right)^2 - 1 \right) \right] \times t$ 80	$\left[\left(\left(\frac{I_f}{I_{set}} \right)^1 - 1 \right) \right] \times t$ 120

Waktu operasi (t) untuk karakteristik kurva *Standard Inverse* :

$$t = \frac{tms \times 0,14}{\left(\frac{I_{hs}}{I_s} \right)^{0,02} - 1} \tag{15}$$

Persyaratan lain yang harus dipenuhi adalah penyetelan waktu minimum dari Relay arus lebih (terutama di penyulang) tidak lebih kecil dari 0,3 detik. Pertimbangan ini diambil agar Relay tidak sampai trip lagi, akibat arus Inrush current dari transformator distribusi yang memang sudah tersambung di jaringan distribusi, sewaktu PMT penyulang tersebut dioperasikan. Penyetelan Ground Fault Relay (GFR) dapat di setel mulai 6% s/d 12% x arus gangguan hubung singkat 1 fase terjauh/terkecil.

$$I_{set} = 10\% \times I_{F1 \text{ fase terkecil}} \tag{16}$$

Nilai ini untuk mengantisipasi jika penghantar tersentuh pohon, dimana tahanan pohon besar (sesuai standard ± 26 ohm) yang dapat memperkecil besarnya arus gangguan hubung singkat 1 fase ketanah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Setting Arus Kerja OCR

Setting arus pada relay arus lebih dilakukan berdasarkan arus nominal peralatan (I_N) dikali faktor keamanan. Berdasarkan persamaan 10 dan persamaan 13 maka setting arus relay arus lebih Pada Penyulang Kalingga adalah sebagai berikut :

- Incoming Penyulang Kalingga

$$I_{S \text{ primer}} = \frac{1,1}{1} \cdot \frac{60 \text{ MVA}}{20 \text{ KV}, 1,73} = 1.905 \text{ A} \qquad I_{S \text{ sekunder}} = 1.905 \text{ A} \cdot \frac{1}{2000} = 0,9525 \text{ A}$$

Untuk menghitung arus setting relay pada outgoing penyulang, GH Bowling dan GH Poltekpar dapat menggunakan cara yang sama seperti diatas, sehingga akan didapatkan hasil pada tabel 5 berikut ini:

Tabel 5. Setting Arus Kerja Relay OCR GI New Jakabaring

Relay Arus Lebih (OCR)	Incoming Penyulang Kalingga	Outgoing Penyulang Kalingga	GH Bowling	GH Poltekpar
I _s (primer)	1.905 A	393,8 A	299,2 A	299,2 A
I _s (sekunder)	0,9505 A	3,281 A	4,89 A	4,89 A

Pada setting waktu dimulai pada relay proteksi terjauh dengan jarak waktu kerja tiap – tiap relay adalah 0,3 detik. Pertimbangan ini diambil agar Relay tidak sampai trip kembali, akibat arus Inrush current dari transformator distribusi yang memang sudah tersambung di jaringan distribusi, sewaktu PMT penyulang tersebut dioperasikan.

3.2 Perhitungan Arus Hubung Singkat

3.2.1 Impedansi Sumber

Berdasarkan data nilai arus hubung singkat di bus 150 kV Gardu Induk New Jakabaring adalah sebesar 11,5 kA sesuai dengan data trafo yang terpasang maka dapat konversikan menjadi MVA_{sc}, sehingga diperoleh :

$$\begin{aligned} MVA_{sc} &= I_{sc} \times (VL-L \text{ primer Trafo} \times \sqrt{3}) \\ MVA_{sc} &= 11,5 \text{ kA} \times (150 \text{ kV} \times \sqrt{3}) \\ MVA_{sc} &= 2987,78 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Berdasarkan daya hubung singkat sebesar 2987,78 MVA dan diperoleh impedansi short circuit dengan menggunakan persamaan 1 maka diperoleh :

$$X_s (150kV) = \frac{kV^2}{MVAsc}; = \frac{150^2}{2987,78} = 7,53 \text{ ohm}$$

Karena arus gangguan hubung singkat yang akan dihitung adalah gangguan hubung singkat disisi 20 kV, maka impedansi sumber tersebut harus dikonversikan ke sisi 20 kV, sehingga perhitungan arus gangguan hubung singkatnya menggunakan tegangan 20 kV. Untuk mengkonversikan impedansi yang terletak di sisi 150 kV kesisi 20 kV, dilakukan dengan mempergunakan persamaan 2 maka diperoleh :

$$X_{sc} (20kV) = \frac{20^2}{150^2} \times 7,53 \text{ ohm} = 0,1338 \text{ ohm}$$

3.2.2 Reaktansi Transformator

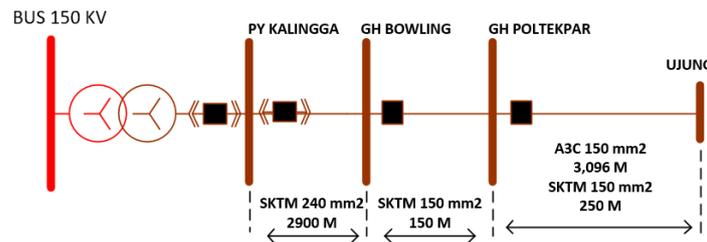
Besarnya reaktansi trafo daya #2 di Gardu Induk New Jakabaring adalah 12,17%. Dengan menggunakan persamaan 2.3 dapat diketahui nilai reaktansi urutan positif dan negatif dalam ohm, maka nilai resistansi pada 100% panjang penyulang, yaitu :

$$X_t = \frac{20^2}{60} = 6,67 \text{ ohm.}$$

Dengan menggunakan persamaan 3 dapat diketahui nilai reaktansi urutan positif dan negatif ($X_{t1} = X_{t2}$) :
 $X_{t1} = 12,17\% \times 6,67 \text{ ohm} = 0,81 \text{ Ohm}$. Pada Trafo Tenaga #2 pada Gardu Induk New Jakabaring memakai belitan YNyn0+d maka sehingga nilai reaktansi urutan nol sebagai berikut :
 $X_{t0} = 3 \times X_{t1}$: $X_{t0} = 3 \times 0,81$; = 2,43 ohm

3.2.3 Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang yang akan dihitung tergantung dari besarnya impedansi per km (ohm/km) dari penyulang yang dihitung, dimana nilainya ditentukan dari jenis penghantar, luas penampang dan panjang jaringan Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) atau jaringan Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM).



Gambar 4. Jaringan Penyulang Kalingga

Distribusi tenaga listrik dari outgoing Penyulang Kalingga GI New Jakabaring ke GH Bowling menggunakan SKTM jenis penghantar Aluminium dengan luas penampang 240 mm² panjang 2900 m. Dari GH Bowling ke GH Poltekpar menggunakan kabel tanah penghantar aluminium luas penampang 150 mm² dengan panjang jaringan 150 m. Untuk distribusi dari Gardu Hubung Poltekpar ke Ujung Jaringan Kalingga menggunakan SUTM A3C luas penampang 150 mm² panjang 3578 m dan SKTM dengan penghantar Al luas penampang 150 mm² panjang 250 m. Berdasarkan persamaan 7 serta data pada tabel 2 tentang tahanan (R) dan reaktansi (XL) SUTM A3C dan kabel tanah XLPE dengan penghantar aluminium maka didapatkan impedansi urutan positif, negatif dan nol sebagai berikut :

Tabel 6. Impedansi Penyulang Kalingga – Ujung Penyulang

Konduktor (mm ²)	Panjang (km)	R/X	R (ohm/km)	jX (ohm/km)	R (ohm)	jX (ohm)
XLPE 240	2,9	X ₁	0,125	0,097	0,363	0,281
		X ₀	0,275	0,029	0,798	0,084
XLPE 150	0,4	X ₁	0,206	0,104	0,082	0,042
		X ₀	0,356	0,312	0,142	0,125
A3C 150	3,096	X ₁	0,2162	0,3305	0,669	1,023
		X ₀	0,3631	1,618	1,124	5,009
Rangkaian Seri			X₁ = X₂ =		1,114	1,35
			X₀ =		2,064	5,218

Berdasarkan hasil pada tabel 6 diatas dapat diketahui bahwa impedansi penyulang Kalingga dari pangkal sampai ujung jaringan adalah : $X_1 = X_2 = 1,114 + j1,35 \text{ ohm}$, $X_0 = 2,064 + j5,218 \text{ ohm}$

3.2.4 Impedansi Ekuivalen

Perhitungan Impedansi ekuivalen adalah perhitungan impedansi posisi Aatif (Z1eq), negatif (Z2eq), dan nol (Z0eq) dari titik gangguan sampai ke sumber. Perhitungan Z1eq dan Z2eq langsung dapat menjumlahkan impedansi-impedansi yang ada, sedangkan Z0eq dimulai dari titik gangguan sampai ke Transformator tenaga yang netralnya ditanahkan. Dengan menggunakan persamaan 7 dan 8 dapat diketahui impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif pada penyulang GI New Jakabaring – GH Bowling adalah sebagai berikut :

- Impedansi Ekuivalen Penyulang Urutan Positif dan Negatif $Z_1 / Z_2 (\Omega)$ pada jarak 1% dari sumber $(1\% \times 0,363) + j(0,943 + 1\% \times 0,281) = 0,0036 + j0,9458$
- Impedansi Ekuivalen Penyulang Urutan Nol / $Z_0 (\Omega)$ pada jarak 1% dari sumber $\{(1\% \times 0,798 + 120) + j(1\% \times 0,084 + 2,43)\} = 120,008 + j2,4308$

Untuk jarak 25% dan seterusnya dapat menggunakan cara yang sama, demikian juga untuk GH yang lain pada penyulang Kalingga, sehingga didapatkan data seperti pada tabel 7 berikut ini

Tabel 7 Impedansi Ekuivalen Penyulang

Jarak	Impedansi Ekuivalen Penyulang Kalingga					
	GI New Jakabaring – GH Bowling		GH Bowling – GH Poltekpar		GH Poltekpar – Ujung	
	Urutan Positif dan Negatif $Z_1 / Z_2 (\Omega)$	Urutan Nol $Z_0 (\Omega)$	Urutan Positif dan Negatif $Z_1 / Z_2 (\Omega)$	Urutan Nol $Z_0 (\Omega)$	Urutan Positif dan Negatif $Z_1 / Z_2 (\Omega)$	Urutan Nol $Z_0 (\Omega)$
1%	0,0036 + j0,9458	120,008 + j2,4308	0,36331 + j1,22416	120,798 + j2,514	0,401 + j1,250	120,863 + j2,61
25%	0,09075 + j1,0132	120,199 + j2,451	0,37075 + j1,228	120,811 + j2,525	0,574 + j1,50	121,154 + j3,831
50%	0,1815 + j1,0835	120,399 + j2,472	0,3785 + j1,232	120,824 + j2,5375	0,754 + j1,764	121,457 + j5,102
75%	0,2722 + j1,1537	120,598 + j2,493	0,38625 + j1,236	120,837 + j2,54925	0,934 + j2,026	121,760 + j6,373
100%	0,363 + j1,224	120,798 + j2,514	0,394 + j1,24	120,851 + j2,561	1,115 + j2,289	122,064 + j7,644

3.3 Perhitungan Arus Hubung Singkat

3.3.1 Arus Hubung Singkat pada GI New Jakabaring

Dengan menggunakan persamaan 10 untuk mengetahui besar arus hubung singkat 3 fasa dan persamaan 12 untuk mengetahui besar arus hubung singkat 1 fasa, dengan menggunakan impedansi ekuivalen Tabel 7.

$$I_{sc3fasa} = \frac{20000/\sqrt{3}}{Z_{1eq}} = \frac{11547}{Z_{1eq}}, \quad I_{sc1fasa} = \frac{3 \times 20000/\sqrt{3}}{Z_{1eq} + Z_{2eq} + Z_{0eq}} = \frac{34.641}{2(Z_{1eq}) + Z_{0eq}}$$

Didapatkan hasil perhitungan Arus Hubung singkat 3 fasa dan 1 fasa pada GI New Jakabaring – GH Bowling, GH Bowling – GH Poltekpar dan GH Poltekpar – ujung Penyulang dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 8. Arus Gangguan Hubung Singkat di GI New Jakabaring

Jarak	Arus Hubung Singkat (Isc)					
	GI New Jakabaring – GH Bowling		GH Bowling – GH Poltekpar		GH Poltekpar – Ujung	
	Isc 3φ (A)	Isc 1φ (A)	Isc 3φ (A)	Isc 1φ (A)	Isc 3φ (A)	Isc 1φ (A)
1%	12.199	288,59	9.043	284,81	8.976	284,47
25%	11.351	287,71	9.001	284,75	7.189	283,01
50%	10.510	286,80	8.959	284,68	6.019	281,02
75%	9.741	285,80	8.916	284,61	5.175	279,2
100%	9.044	284,83	8.874	284,54	4.535	277,3

3.4 Karakteristik Kerja Relay Arus Lebih

Hasil perhitungan arus hubung singkat digunakan untuk menentukan waktu tunda (TMS) pada relay arus lebih dan relay gangguan tanah dengan persamaan *standard inverse*. Untuk I fault OCR digunakan arus hubung singkat terbesar di depan lokasi proteksi yaitu gangguan hubung singkat 3 phasa jarak 1% di depan lokasi proteksi. Berdasarkan persamaan standat invers pada tabel 1 didapatkan nilai tms dari masing – masing relay arus lebih pada Penyulang Kalingga sebagai berikut :

- OCR GH Poltekpar
 $I_s (\text{primer}) = 299,2 \text{ A}; I_s (\text{sekunder}) = 4,98 \text{ A}; I_{\text{fault}} = 8.796 \text{ A}; t = 0,1 \text{ detik, sehingga :}$
 $TMS = \frac{\left(\left(\frac{8,796}{299,2}\right)^{0,02} - 1\right)}{0,14} \times 0,1; TMS = 0,049 \text{ det}$

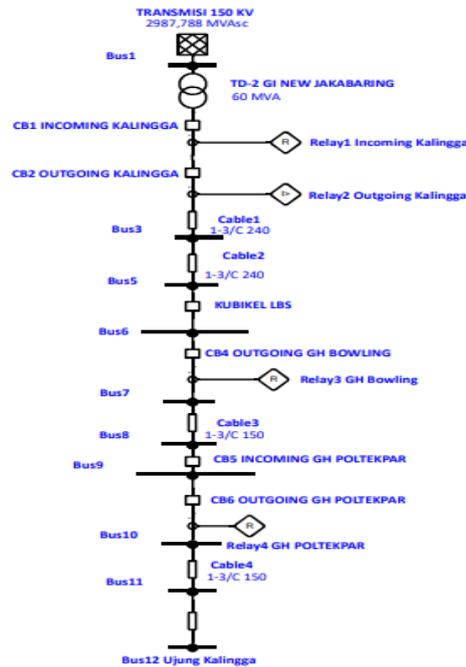
Dengan melakukan perhitungan yang sama seperti menentukan TMS OCR GH Poltekpar maka didapatkan waktu tunda untuk GH Bowling, Outgoing dan incoming pada penyulang Kalingga, seperti ditunjukkan pada tabel berikut ini:

Tabel 9. Waktu Kerja Relay OCR GI New Jakabaring

Besarnya arus gangguan hubung singkat 3 fasa dipengaruhi oleh jarak titik gangguannya, semakin jauh jarak titik gangguan dari sumber, maka akan semakin kecil gangguan arus hubung singkatnya. Begitu juga sebaliknya, semakin dekat jarak titik gangguan maka arus gangguan hubung singkat semakin besar. Ini disebabkan karena semakin besar nilai impedansi ekivalen (tahanan gangguan). Berdasarkan gambar 5b dapat dilihat bahwa arus gangguan hubung singkat 1 fasa terbesar adalah 288,59 A pada jarak 0% dari sumber atau GI New Jakabaring, sedangkan untuk gangguan hubung singkat 1 fasa terkecil 277,3 A dengan jarak gangguan berada di 100% panjang Penyulang Kalingga atau pada ujung jaringan.

3.5.2. Analisa Waktu Kerja OCR dan GFR di GI New Jakabaring Penyulang Kalingga

Berdasarkan hasil perhitungan setting waktu untuk relay OCR dan GFR yang telah didapatkan dan hasil perhitungan tersebut telah diinput serta disimulasikan menggunakan software ETAP didapatkan hasil seperti pada tabel 9 untuk hasil simulasi OCR dan tabel 10 untuk hasil simulasi GFR. Pada gambar 6 berikut ini merupakan pemodelan singel line diagram Penyulang Kalingga pada ETAP 19.0.1:



Gambar 6. Model *Single Line Diagram* Penyulang Kalingga menggunakan ETAP 19.0.1

Dari hasil simulasi koordinasi rele OCR dan GFR menggunakan software ETAP 19.0.1, maka didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada tabel berikut ini:

Tabel 11. Simulasi Waktu Kerja OCR Penyulang Kalingga

Lokasi Gangguan	Isc 3 fasa (A)	Simulasi OCR			
		Lokasi Relay Proteksi	GH Poltekpar (s)	GH Bowling (s)	Outgoing (s)
Poltekpar	8.796	0,1	0,4	0,64	1,1
Bowling	9.043	Tidak bekerja	0,39	0,69	1,07
Outgoing	12.199	Tidak bekerja	Tidak bekerja	0,59	0,91
Incoming	12.244	Tidak bekerja	Tidak bekerja	Tidak bekerja	0,951

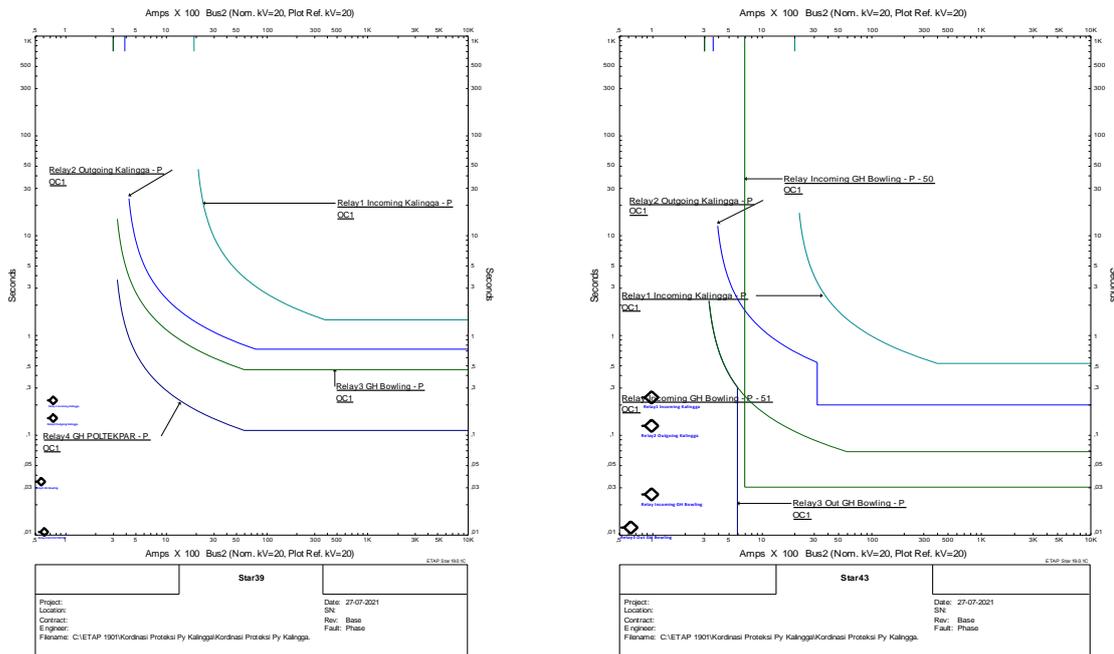
Dari hasil simulasi *relay* arus lebih di GH Poltekpar akan bekerja 0,1 detik saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada jarak 1% didepan GH Poltekpar, kemudian untuk lokasi gangguan yang sama *relay* arus lebih pada GH Bowling akan bekerja dengan waktu 0,4 detik. Hal ini dikarenakan pada saat *setting* waktu telah ditentukan bahwa selang waktu kerja antar *relay* proteksi untuk besar arus gangguan yang sama adalah 0,3 detik.

Pada tabel 12 dapat diketahui bahwa *relay* gangguan tanah di GH Poltektpar akan bekerja 0,1 detik saat terjadi gangguan hubung singkat 3 fasa pada jarak 1% didepan GH Poltektpar, kemudian untuk lokasi gangguan yang sama *relay* gangguan tanah pada GH Bowling akan bekerja dengan waktu 0,4 detik. Hal ini dikarenakan pada saat *setting* waktu telah ditentukan bahwa selang waktu kerja antar *relay* proteksi untuk besar arus gangguan yang sama adalah 0,3 detik, dilihat semua *relay* yang ada di Penyulang Kalingga bekerja berdasarkan arus terhadap waktu. Semakin besar arus gangguan singkat maka semakin cepat juga waktu kerja dari *relay* proteksi. Dari bentuk kurva tersebut juga dapat dilihat bahwa *setting relay* berdasarkan perhitungan dapat bekerja selektif, dilihat dari tidak adanya kurva *relay* yang berpotongan satu dengan yang lain.

Tabel 12. Simulasi Waktu Kerja GFR Penyulang Kalingga

Lokasi Gangguan	Isc 3 fasa (A)	Lokasi Relay Proteksi			
		GH Poltektpar (s)	GH Bowling (s)	Outgoing (s)	Incoming (s)
Poltektpar	283,7	0,1	0,4	0,68	0,99
Bowling	283,9	Tidak bekerja	0,39	0,69	0,99
Outgoing	2,87	Tidak bekerja	Tidak bekerja	0,58	0,98
Incoming	2,876	Tidak bekerja	Tidak bekerja	Tidak bekerja	0,98

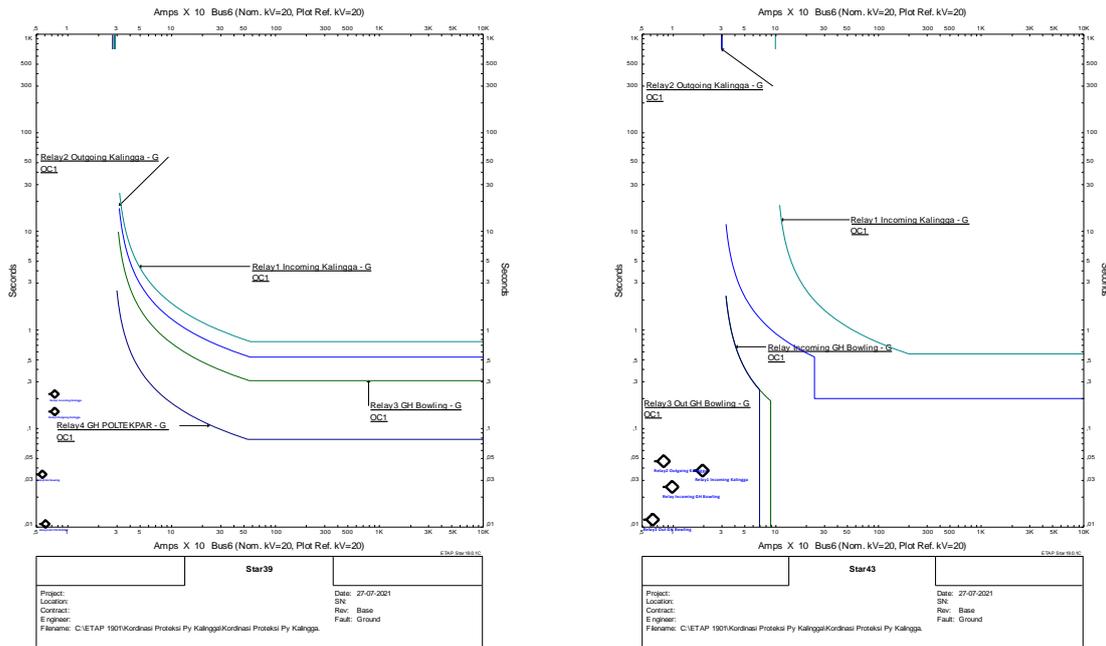
Pada gambar 7b koordinasi OCR eksisting PT PLN tidak baik karena pada GH Poltektpar Jurusan Ujung Kalingga tidak dipasang *relay* proteksi, sehingga ketika ada gangguan hubung singkat pada lokasi GH Poltektpar – Ujung Jaringan maka *relay* yang bekerja adalah *relay* outgoing GH Bowling. Tentu saja ini merugikan karena padamnya keseluruhan jaringan listrik GH Poltektpar, jika terpasang *relay* proteksi pada GH Poltektpar dan berkoordinasi dengan baik maka hanya wilayah yang mengalami gangguan hubung singkat saja yang padam (selektif).



a). Kurva Karakteristik hasil Simulasi ETAP 19.0.1 b). Kurva Karakteristik Relay PT. PLN (Persero) UP3 Palembang

Gambar 7. Kurva Karakteristik Koordinasi Relay Arus Lebih

Dari hasil simulasi kurva karakteristik koordinasi relay gambar 7a pada penyulang Kalingga, dapat Pada gambar 10 dapat dilihat bahwa kurva antara *relay* satu dan *relay* lainnya saling berhimpit dan berpotongan, hal ini dapat mengakibatkan kegagalan koordinasi proteksi. Oleh karena itu diperlukan *resetting relay* proteksi pada Penyulang Kalingga Gardu Induk New Jakabaring.



a). Kurva Karakteristik Koordinasi GFR Hasil Simulasi ETAP 19.0.1

b). Kurva Relay Gangguan Tanah (Existing) PT. PLN (Persero) UP3 Palembang

Gambar 8. Kurva Karakteristik Koordinasi Relay Gangguan Tanah

Pada gambar 8 diketahui bahwa *relay* gangguan tanah dapat bekerja dengan koordinasi yang baik dengan tidak adanya kurva *relay* gangguan tanah yang berpotongan satu dengan lainnya. Artinya untuk *setting relay* tersebut sudah benar. Dapat dilihat bahwa kurva *relay* gangguan tanah existing PT PLN berhimpit antara *relay* pada Incoming GH Bowling dan Outgoing GH Bowling. Selain itu tidak terdapat *relay* gangguan tanah pada lokasi GH Poltekpar – Ujung Penyulang sehingga apabila ada gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah pada lokasi GH Poltekpar – Ujung Penyulang maka *relay* pada GH Bowling akan mentriprkan CB GH Bowling dan membuat teerputusnya distribusi ke GH Poltekpar.

4. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan dari bab sebelumnya dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan perhitungan diperoleh nilai *setting relay* untuk nilai arus lebih karakteristik standar inverse pada GH Poltekpar adalah 299,2 A (primer) / 4,98 A (sekunder), pada GH Bowling adalah 299,2 A (primer) / 4,48 A (sekunder), pada penyulang outgoing 20 kV adalah 393,8 A (primer) / 3,281 A (sekunder), nilai *setting relay* arus lebih pada incoming trafo 20 kV adalah 1905 A (primer) / 0,9252 A (sekunder).
2. Kurva karakteristik yang dipilih adalah kurva standar inverse (SI) dengan tujuan untk mendapatkan koordinasi *setting relay* yang baik antaran *relay* incoming trafo sisi 20 kV, penyulang 20 kV dan gardu hubung pelanggan.
3. Berdasarkan perhitungan diperoleh *setting* nilai TMS untuk *relay* arus lebih pada proteksi terjauh yaitu GH Poltekpar 0,499 dan TMS pada *relay* gangguan tanah adalah 0,034, nilai *setting* TMS untuk *relay* arus lebih pada GH Bowling adalah 0,199 dan TMS pada *relay* gangguan tanah adalah 0,134, nilai *setting* TMS *relay* arus lebih pada outgoing Penyulang Kalingga di Gardu Induk New Jakabaring adalah 0,319 dan TMS untuk *relay* gangguan tanah 0,232, sedangkan TMS untuk sisi incoming Penyulang Kalingga adalah 0,248 dan TMS untuk *relay* gangguan tanah adalah 0,33.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Manajer Bagian Konstruksi dan staff, Supervisor, dan seluruh karyawan PT. PLN (Persero) UP3 Palembang yang telah membantu dalam penelitian ini, yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Syufrijal. 2014. *Jaringan Distribusi Tenaga Listrik Semester 1*. Jakarta : Kementerian Pendidikan Dasar Menengah dan Kebudayaan Republik Indonesia.
- [2] Suhadi, dkk. 2008. *Teknik Distribusi Tenaga Listrik Jilid 1*. Jakarta : Departemen Pendidikan Nasional.
- [3] PT. PLN (Persero). “*Profil Perusahaan*”. <https://web.pln.co.id/tentang-kami/profil-perusahaan> [online] [Accessed Jan. 20, 2022].
- [4] Urdaneta, Alberto. J., Restrepo, H., Márquez, S., & Sánchez, J. (1996). *Coordination of directional overcurrent relay timing using linear programming*. IEEE Transactions on Power Delivery, 11(1), 122–128. <http://doi.org/10.1109/61.484008>. Caracas: Universidad Simon Bolivar. Venezuela.
- [5] Singh, Manohar., Panigrahi, B. K., & Abhyankar, a. R. (2011). *Optimal overcurrent relay coordination in distribution system*. Proceedings - 2011 International Conference on Energy, Automation and Signal, ICEAS - 2011, (2), 822–827. <http://doi.org/10.1109/ICEAS.2011.6147214>.
- [6] Zeienldin, H., El-Saadany, E. F., & Salama, M. a. (2004). *A novel problem formulation for directional overcurrent relay coordination*. 2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering (IEEE Cat. No.04EX819), 48–52. <http://doi.org/10.1109/LESCPE.2004.1356265>
- [7] Kadarisman, Pribadi dan Wahyudi Sarimun. 2002. *Koordinasi OCR GFR pada Jaringan Distribusi*. Jakarta : PT. PLN (Persero) Jasa Pendidikan dan Pelatihan.
- [8] MyElectrical engineering, <https://myelectrical.com/notes/entryid/159/electromechanical-relays>. [Accessed Jan. 20, 2022].