

STUDI UNJUK KERJA RECLOSER ADVC2-N PADA PENYULANG GARDENIA SUTM 20 KV DI GI SEI RAYA PT. PLN (PERSERO) PONTIANAK

Erdi¹, Danial², Managam Rajagukguk³

erdias945@gmail.com¹, danial.noah@ee.untan.ac.id², managam.rajagukguk@ee.untan.ac.id³

Universitas Tanjungpura

ABSTRAK

Dalam sistem distribusi tenaga listrik, keandalan dan kontinuitas pasokan listrik menjadi faktor utama yang harus dijaga. Salah satu perangkat proteksi yang berperan penting dalam menangani gangguan pada jaringan distribusi adalah recloser. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis unjuk kerja recloser ADVC2-N pada penyulang Gardenia SUTM 20 kV di GI Sei Raya, PT. PLN (Persero) Pontianak, khususnya dalam menentukan waktu kerja (t) dan menentukan TMS (Time Multiplier Setting) recloser saat terjadi gangguan. Metode penelitian yang digunakan meliputi studi literatur, pengumpulan data operasional recloser, perhitungan arus gangguan hubung singkat, serta analisis performa proteksi. Dari hasil analisis, ditemukan bahwa pengaturan waktu recloser sangat berpengaruh terhadap keandalan jaringan, di mana penyesuaian setting yang optimal dapat mengurangi frekuensi pemadaman dan meningkatkan indeks keandalan jaringan sistem distribusi di PT. PLN (Persero) Pontianak. Selain itu, koordinasi antara recloser dengan sistem proteksi lainnya perlu diperhatikan agar tidak terjadi gangguan yang berulang atau pemutusan yang tidak diperlukan. Dari perbandingan uji selektivitas setting proteksi diperoleh hasil waktu kerja penyulang Gardenia (1,228 detik) dengan Time Multiplier Setting (0,10) dan waktu kerja AR Taruna (0,625 detik) dengan Time Multiplier Setting (0,05). Setting proteksi penyulang Gardenia dan AR Taruna telah memenuhi prinsip selektivitas waktu karena AR Taruna merespon terlebih dahulu jika terjadi gangguan sebelum proteksi penyulang Gardenia.

Kata Kunci: Recloser Advc2-N, Proteksi Sistem Distribusi, Gangguan Hubung Singkat, Keandalan Jaringan, Penyulang Gardenia.

ABSTRACT

In electrical power distribution systems, reliability and continuity of power supply are key factors that must be maintained. One of the protective devices that plays a crucial role in addressing faults in the distribution network is the recloser. This study aims to analyze the performance of the ADVC2-N recloser on the 20 kV Gardenia feeder at the Sei Raya Substation, PT. PLN (Persero) Pontianak, particularly in determining the operating time (t) and setting the Time Multiplier Setting (TMS) during fault conditions. The research methodology includes literature review, collection of recloser operational data, short-circuit fault current calculations, and protection performance analysis. The analysis results show that the recloser's timing settings significantly impact network reliability, where optimal setting adjustments can reduce the frequency of outages and improve the reliability index of the distribution system at PT. PLN (Persero) Pontianak. Additionally, coordination between the recloser and other protection systems is essential to prevent repeated faults or unnecessary disconnections. From the protection selectivity test comparison, the Gardenia feeder's operating time is found to be 1.228 seconds with a TMS of 0.10, while AR Taruna operates at 0.625 seconds with a TMS of 0.05. The protection settings of the Gardenia and AR Taruna feeders meet the time selectivity principle, as AR Taruna responds first in the event of a fault before the Gardenia feeder protection activates.

Keywords: Advc2-N Recloser, Distribution System Protection, Short-Circuit Fault, Network Reliability, Gardenia Feeder.

PENDAHULUAN

Dengan melihat perkembangan teknologi di dunia, segala pekerjaan dilakukan dengan cepat, tepat, dan sesuai dengan target. Ini merupakan suatu hal yang sangat diinginkan oleh manusia [1], salah satunya dalam penggunaan listrik di dunia. Pada saat ini listrik merupakan kebutuhan pokok bagi manusia karena hampir semua aktivitas membutuhkan energi listrik [2].

Dalam hal ini PT. PLN (Persero) sebagai pemasok listrik utama di negara Indonesia harus mampu melayani seluruh kebutuhan listrik masyarakat dengan baik. PT. PLN (Persero) merupakan Badan Usaha Milik Negara (BUMN) yang bergerak pada bisnis penyediaan jasa ketenagalistrikan kepada pelanggan. Oleh karena itu, upaya yang dilakukan untuk meningkatkan pendapatan perusahaan adalah mengurangi potensi tidak terjualnya energi listrik yang telah dibangkitkan dan disalurkan melalui Jaringan Tegangan Menengah dan Tegangan Rendah yang disebabkan oleh gangguan jaringan distribusi listrik [2].

Pengamanan sistem distribusi tenaga listrik merupakan salah satu unsur dari pemenuhan pelayanan. Jumlah pemadaman atau gangguan yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik menjadi acuan dalam menentukan keandalan suatu sistem tenaga listrik [3]. Keandalan suatu sistem tenaga listrik salah satunya bergantung pada peralatan proteksi yang digunakan [2]. Sistem proteksi adalah suatu sistem pengamanan terhadap peralatan listrik, yang diakibatkan adanya gangguan teknis, gangguan alam, kesalahan operasi, dan penyebab yang lainnya. Dalam sistem kelistrikan modern, proteksi arus lebih (overcurrent protection) merupakan salah satu aspek krusial untuk menjaga keandalan dan keamanan operasi sistem tenaga listrik. Arus lebih dapat disebabkan oleh berbagai kondisi abnormal seperti hubung singkat, kelebihan beban, atau gangguan lain dalam sistem distribusi tenaga listrik. Oleh karena itu, proteksi yang efektif sangat penting untuk meminimalkan kerusakan dan memulihkan suplai listrik secepat mungkin [4].

Perangkat proteksi yang sering digunakan salah satunya adalah recloser. Recloser adalah perangkat yang berfungsi untuk memutuskan dan menyambungkan kembali aliran listrik secara otomatis ketika terjadi gangguan sementara. Koordinasi antara recloser dan rele arus lebih yang terpasang di gardu induk sangat dibutuhkan supaya mendapatkan hasil kerja yang semestinya dan proteksi jaringan distribusi menjadi aman. Dilakukannya pemasangan recloser sebagai upaya menghilangkan gangguan yang bersifat sementara. Dalam studi unjuk kerja recloser pada jaringan distribusi SUTM 20 kV ini, tentu saja ada kendala yang akan dihadapi meliputi koordinasi dengan rele dan fuse cabang yang ada di penyulang Gardenia yang berada di GI Sei Raya. Hasil dari studi ini diharapkan dapat memberikan informasi yang berguna bagi para pengguna jaringan distribusi 20 kV untuk meningkatkan unjuk kerja jaringan mereka. Selain itu, hasil studi ini juga diharapkan dapat memberikan panduan bagi para peneliti dalam mengembangkan teknologi serta produk baru yang lebih baik untuk meningkatkan unjuk kerja jaringan distribusi SUTM 20 kV [5].

METODE

A. Bahan Penelitian

Bahan penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah data gangguan hubung singkat yang terjadi pada jaringan sistem distribusi 20 kV, setting waktu buka tutup recloser dan data waktu kerja recloser pada penyulang Gardenia di GI Sei Raya, PT.PLN (Persero) Pontianak.

B. Alat Yang Dipergunakan

Adapun alat-alat yang diperlukan untuk menunjang penelitian ini agar dapat berjalan dengan lancar dan memudahkan penulis adalah sebagai berikut

a). Laptop Dengan *Software* Pendukung

Laptop ini berfungsi dalam melakukan penulisan proposal dan laporan penelitian penulis menggunakan *software microsoft office 2016*.

b). Kalkulator dan Alat Tulis

Berfungsi untuk membantu perhitungan dan mencatat data hasil perhitungan berdasarkan persamaan – persamaan yang di butuhkan dalam penelitian ini.

C. Perhitungan

a) Menghitung Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang sering terjadi pada sistem tenaga, dapat menyebabkan arus yang besar (arus gangguan) mengalir secara tiba-tiba. Dalam jaringan sistem tenaga listrik terdapat tiga macam gangguan yaitu :

- Hubung singkat satu fasa tanah
- Hubung singkat dua fasa
- Hubung singkat tiga fasa

b) Menghitung arus nominal sisi 20 kV

$$V_{per\ unit\ (pu)} = \frac{V_{sec}}{V_{dasar}} \quad (1)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} V_{per\ unit\ (pu)} &= \text{Tegangan per unit (pu)} \\ V_{sec} &= \text{Tegangan sekunder sisi 20 kV (V)} \\ V_{dasar} &= \text{Tegangan dasar sisi 20 kV (kV)} \\ Z_{dasar} &= \frac{(V_{sec})^2}{S} \end{aligned} \quad (2)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} Z_{dasar} &= \text{Impedansi Dasar } (\Omega) \\ V_{sec} &= \text{Tegangan Sekunder sisi 20 kV (V)} \\ S &= \text{Daya Transformator (MVA)} \\ I_{dasar} &= \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{sec}} \end{aligned} \quad (3)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} I_{dasar} &= \text{Arus dasar (A)} \\ S &= \text{Daya Transformator (MVA)} \\ V_{sec} &= \text{Tegangan Sekunder sisi 20 kV (V)} \\ \sqrt{3} &= \text{faktor untuk tiga fasa} \end{aligned}$$

c) Menghitung Impedansi Sumber

Perhitungan impedansi sumber dilakukan pada bus 20 kV tapi sebelum itu harus terlebih dahulu menghitung konversi daya hubung singkat sisi 150 kV ke 20 kV, dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$S_{sc20kV} = S_{sc150kV} \times \left(\frac{V_{sec}}{V_{pri}} \right)^2 \quad (4)$$

Keterangan:

$$\begin{aligned} S_{sc20kV} &= \text{Daya hubung singkat sisi 20 kV (V)} \\ S_{sc150kV} &= \text{Daya hubung singkat sisi 150 kV (V)} \\ V_{pri} &= \text{Tegangan prime sisi 150 kV (V)} \\ V_{sec} &= \text{Tegangan Sekunder sisi 20 kV (V)} \end{aligned}$$

Setelah hasil daya hubung singkat sisi 20 kV diperoleh, maka dilanjutkan dengan menghitung Impedansi sumber sisi 20 kV menggunakan persamaan, sebagai berikut :

$$Z_{sumber20kV} = j \frac{(V_{sec})^2}{S_{sc20kV}} \quad (5)$$

Keterangan:

$$Z_{sumber20kV} = \text{Impedansi sumber sisi 20 kV } (\Omega)$$

V_{sec} = Tegangan sekunder sisi 20 kV (V)
 S_{sc20kV} = Daya hubung singkat sisi 20 kV (V)

d) Perhitungan Impedansi Transformator

Pada impedansi transformator memiliki nilai Impedansi urutan positif yang sama dengan nilai Impedansi urutan negatif ($Z_{trans1} = Z_{trans2}$). Maka, impedansi transformator dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$Z_{trans1} = Z_{trans lama} \times \left(\frac{V_{sec lama}}{V_{sec baru}}\right)^2 \times \left(\frac{S_{lama}}{S_{baru}}\right)^2 \quad (6)$$

Keterangan:

$Z_{trans 1}$ = Impedansi transformator (Ω)
 $V_{sec lama}$ = Tegangan sekunder sisi 20 kV lama (V)
 $V_{sec baru}$ = Tegangan sekunder sisi 20 kV baru (V)
 S_{lama} = Daya transformator lama (MVA)
 S_{baru} = Daya transformator baru (MVA)

Impedansi transformator urutan positif ($Z_{trans 1}$) dapat dilihat tecantum pada papan nama pada transformator tenaga, besarnya tergantung dari kapasitas transformator. Sedangkan untuk impedansi urutan nol (Z_{trans0}) diperoleh dari data tranformator tenaga itu sendiri, yaitu melihat adanya belitan delta sebagai belitan ketiga dalam trafo tenaga tersebut:

- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan Dyn, dimana kapasitas belitan Delta (D) sama besar dengan kapasitas Y, maka $Z_{trans0} = Z_{trans1}$.
- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan Ydyn, dimana kapasitas belitan delta (d) sepertiga dari kapasitas belitan Y(belitan yang dipakai untuk menyalurkan daya, sedangkan belitan delta tetap ada didalam trafo tenaga, tetapi tidak dikeluarkan kecuali satu terminal delta untuk ditanahkan). Maka nilai $Z_{trans0} = 3Z_{trans1}$.
- Untuk transformator tenaga dengan hubungan belitan YNyn dan tidak mempunyai belitan delta didalamnya, maka besar X_{T0} berkisaran antara 10 sampai 14 dikali Z_{trans1} . Jadi untuk menghitung impedansi transformator urutan nol (Z_{trans0}) menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$Z_{trans0} = 10 \times Z_{trans1} \quad (7)$$

Keterangan:

Z_{trans0} = Impedansi trasformator urutan nol (Ω)
 Z_{trans1} = Impedansi transformator urutan positif/negatif (Ω)

e) Perhitungan Impedansi Penyulang

Nilai impedansi saluran didapat dari jenis penghantar, luas penampang dan panjang penghantar. Untuk persamaan impedansi saluran sebagai berikut :

$$Z = (R + jX) \times \text{Panjang Penyulang} \quad (8)$$

Keterangan :

Z = Impedansi total Saluran (Ω)
 R = Resistansi per satuan panjang (Ω)
 X = Reaktansi per satuan panjang (Ω)
 j = Bilangan imajiner

f) Perhitungan Impedansi Ekvivalen

Untuk menentukan besarnya nilai impedansi ekivalen urutan positif dan negatif dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Z_{1eq} = Z_{2eq} = Z_{sumber20kV(pu)} + Z_{trans12} + Z_{penyulang12} \quad (9)$$

Keterangan:

Z_{1eq}, Z_{2eq} = Impedansi ekivalen urutan positif/negatif sisi 20 kV(Ω)

$Z_{sumber20kV(pu)}$ = Impedansi Sumber sisi 20 kV (V)

$Z_{trans12}$ = Impedansi transformator urutan positif/negatif (Ω)

$Z_{Penyulang12}$ = Impedansi penyulang urutan positif/negatif penghantar (Ω)

Sedangkan untuk mencari nilai impedansi ekivalen urutan nol menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Z_{0eq} = Z_{sumber20kV(pu)} + Z_{trans0} + Z_{penyulang0} + (3 \times Z_{RN}) \quad (10)$$

Keterangan:

Z_{0eq} = Impedansi ekivalen urutan nol sisi 20 kV(Ω)

$Z_{sumber20kV(pu)}$ = Impedansi Sumber sisi 20 kV (V)

Z_{trans0} = Impedansi transformator urutan nol (Ω)

$Z_{Penyulang0}$ = Impedansi penyulang urutan nol (Ω)

g) Perhitungan Arus Hubung Gangguan Hubung Singkat 1 fasa-tanah (L-G)

Arus diperoleh dari pasor yang tidak seimbang disebabkan karena adanya gangguan pada salah satu fasanya. Untuk mencari arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat menggunakan perhitungan sebagai berikut :

$$I_{SC(1\phi-N)} = \frac{3 \times V_{LN}}{2 (Z_{1eq}) + Z_{0eq}} \quad (11)$$

Keterangan:

$I_{SC(1\phi-N)}$ = Arus gangguan satu fasa-tanah (A)

V_{LN} = Tegangan fasa netral (V)

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif/negatif (Ω)

Z_{0eq} = Impedansi ekivalen urutan nol (Ω)

h) Gangguan Hubung Singkat 2 Fasa (L-L)

Gangguan fasa – fasa yang terjadi pada sistem tenaga listrik biasanya karena pohon atau benang layang – layang terbuat dari kawat. Impedansi yang terhubung antara fasa disebabkan impedansi hubung singkat (Z_{sc}). Saat terjadi gangguan 2 fasa di jaringan distribusi akan terjadi pergeseran pada tegangan (V_R dan V_S) baik besarnya yang semakin kecil dan sudut tegangan pada fasa yang terganggu (fasa R dan S) sedangkan arus I_R dan I_S saling berlawanan dan tergeser sudutnya terhadap teganganya akibat dari sudut impedansi jaringan yang terhubung antara fasa R dan S, perhitungan yang digunakan sebagai berikut :

$$I_{SC(2\phi-N)} = \frac{V_{ph}}{2 \times Z_{1eq}} \quad (12)$$

Keterangan:

$I_{SC(2\phi-N)}$ = Arus gangguan 2 fasa (A)

V_{ph} = Tegangan 20 kV fasa-fasa (V)

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif/negatif (Ω)

i) Arus Gangguan Hubung Singkat 3 Fasa (L-L-L)

Gangguan 3 fasa dapat terjadi pada jaringan listrik, karena terhubung ketiga fasanya saat terjadi gangguan 3 fasa di jaringan distribusi akan terjadi pergeseran pada tegangan baik besarnya yang semakin kecil dan sudut fasa pada arus tergeser akibat adanya sudut impedansi jaringan, tetapi pergeseran ini masih menghasilkan pergeseran yang simetris. Perhitungan yang digunakan sebagai berikut :

$$I_{SC(3\phi)} = \frac{V}{Z_{1eq}} \quad (13)$$

Keterangan:

$I_{SC(3\phi)}$ = Arus gangguan 3 fasa (A)

V = Tegangan sekunder 20 kV (V)

Z_{1eq} = Impedansi ekivalen urutan positif/negatif (Ω)

j) Perhitungan Nilai *Time Multiplier Setting* (TMS) dan Waktu Kerja Proteksi *Recloser* dan Penyulang Gardenia

Untuk menghitung waktu kerja proteksi *recloser* dan penyulang Gardenia, langkah pertama adalah menghitung waktu TMS (*Time Multiplier Setting*), yang merupakan faktor pengali atau ukuran sensitivitas dalam operasi relay. Selanjutnya, nilai waktu TMS diperoleh dari hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat. Rumus yang digunakan untuk menentukan waktu kerja *Recloser* didasarkan pada SPLN 64 : 1985 tentang standar proteksi sistem distribusi dan SPLN D3.016-1:2014 tentang standar pengaturan proteksi sistem tenaga listrik dimana kedua SPLN mengacu pada IEC 60225 std C37.112.

Time Multiplier Setting (TMS) dapat dihitung menggunakan persamaan, sebagai berikut:

$$\text{TMS} = \frac{t \times \left(\frac{I_{\text{gangguan}}}{I_{\text{pickup}}} \right)^{\alpha} - 1}{\beta} \quad (14)$$

Waktu kerja (t) dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$t = \frac{\beta \times \text{TMS}}{\left(\frac{I_{\text{gangguan}}}{I_{\text{pickup}}} \right)^{\alpha} - 1} \quad (15)$$

Keterangan:

T = Waktu kerja relay yang diinginkan untuk arus gangguan tertentu (s)

TMS = (*Time Multiplier setting*) Faktor pengali waktu yang digunakan untuk mengatur waktu trip actual dari relay

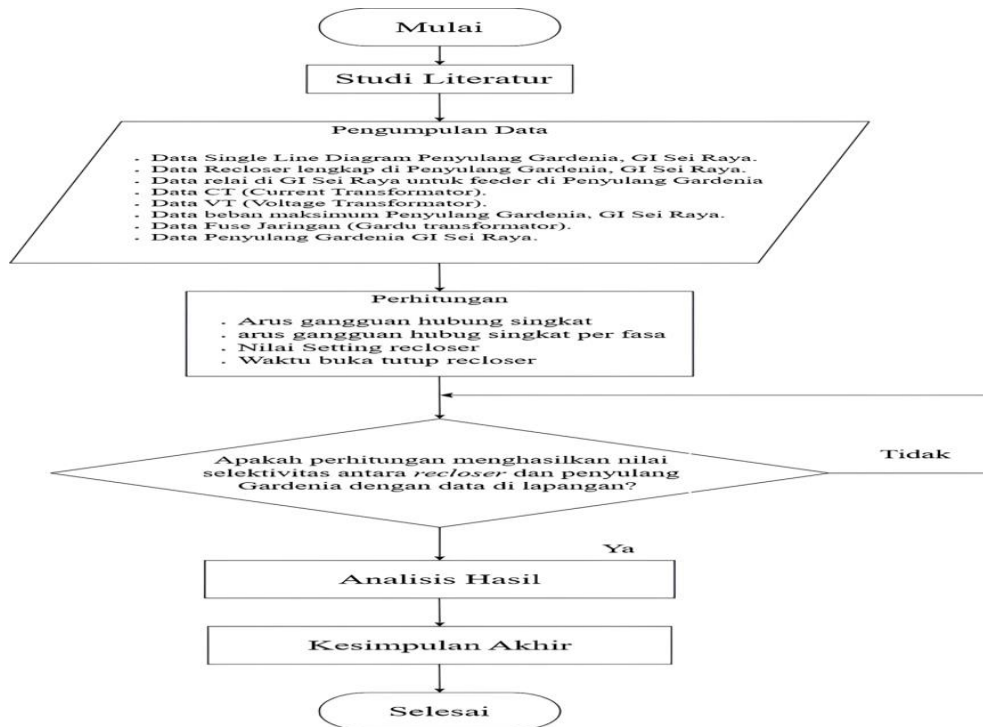
I_{gangguan} = Arus gangguan yang diantisipasi (A)

I_{pickup} = Arus *setting* relay, yaitu arus minimum yang menyebabkan relay mulai bekerja (A)

α, β = Eksponen yang juga bergantung pada jenis kurva waktu-arus

-1 = Bagian dari bentuk matematis kurva waktu-invers, yang menciptakan waktu kerja relay yang lambat saat arus gangguan mendekati arus setting dan cepat saat arus gangguan jauh lebih besar daripada arus setting.

D. Flowchart



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Perhitungan

a) Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat

Menghitung arus Nominal sisi 20 kV dapat menggunakan persamaan (1, 2, 3), yaitu :

$$V_{per\ unit\ (pu)} = \frac{V_{sec}}{V_{dasar}} = \frac{20\ kV}{20\ kV} = 1\ pu$$

$$Z_{dasar} = \frac{(V_{sec})^2}{S} = \frac{(20\ kV)^2}{60\ MVA} = 6,667\ \Omega$$

$$I_{dasar} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V_{sec}} = \frac{60\ MVA}{\sqrt{3} \cdot 20\ kV} = 1732,05\ A$$

b) Menghitung Impedansi Sumber

Perhitungan impedansi sumber memerlukan data daya hubung singkat pada sisi 150 kV di GI Sei Raya. Akan tetapi, data ini tidak dapat langsung digunakan karena merupakan impedansi pada sisi 150 kV. Mengingat perhitungan hubung singkat dalam penelitian ini difokuskan pada sisi 20 kV. Oleh karena itu, perlu dilakukan konversi terlebih dahulu untuk mengetahui nilai daya hubung singkat pada sisi 20 kV, baru dilanjutkan dengan mengetahui impedansi sumber pada sisi 20 kV. Proses konversi daya hubung singkat dan impedansi dari sisi 150 kV ke 20 kV dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan (4) dimana :

Daya Hubung singkat sisi 150 kV ($S_{sc150kV}$) : 1169,82 MVA

Tegangan primer (V_{pri}) : 150 kV

Tegangan sekunder (V_{sec}) : 20 kV

Konversi daya hubung singkat pada sisi 150 kV ke sisi 20 kV :

$$S_{sc20kV} = S_{sc150kV} \times \left(\frac{V_{sec}}{V_{pri}}\right)^2$$

$$= 1169,82\ MVA \times \left(\frac{20}{150}\right)^2$$

$$= 1169,82 \times (0,0178)\ MVA$$

$$= 20,82\ MVA = 20.820.000\ VA$$

Menghitung impedansi sumber sisi 20 kV menggunakan persamaan (5), yaitu:

$$\begin{aligned} Z_{sumber20kV} &= j \frac{(V_{sec})^2}{S_{sc20kV}} \\ &= j \frac{(20 \text{ kV})^2}{20,82 \text{ MVA}} \\ &= j 19,212 \Omega \end{aligned}$$

Konversi nilai Impedansi sumber sisi 20 kV ke per unit (pu) :

$$\begin{aligned} Z_{sumber \text{ per unit (pu)}} &= Z_{pu} \\ Z_{sumber20kV(pu)} &= j \frac{Z_{sumber20kV}}{Z_{dasar}} \text{ pu} \\ &= j \frac{19,212 \Omega}{6,667 \Omega} \text{ pu} \\ &= j 2,8817 \text{ pu} \end{aligned}$$

c) Menghitung Impedansi Transformator

Perhitungan impedansi transformator 1 GI Sei Raya dapat menggunakan persamaan (6), dimana data yang digunakan dalam perhitungan impedansi transformator sebagai berikut

$$\begin{aligned} \text{Daya transformator (S}_{trans}\text{)} &: 60 \text{ MVA} \\ \text{Impedansi transformator (Z}_{lama}\text{)} &: 12,5\% \text{ (Tabel IV.1)} \\ \text{Tegangan Sekuder (V}_{sec}\text{)} &: 20 \text{ kV} \end{aligned}$$

Diketahui Impedansi transformator lama adalah 12,5%, maka harus di konversi terlebih dahulu persen ke per unit (pu) yang mana Z_{lama} sudah pada $S_{dasar} = 60 \text{ MVA}$, sebagai berikut :

$$Z_{pu} = \frac{Z\%}{100} = \frac{12,5}{100} = 0,125 \text{ pu}$$

Maka, diperoleh nilai impedansi transformator urutan positif/negatif $Z_{trans1} = Z_{trans2}$, yaitu:

$$\begin{aligned} Z_{trans1} &= Z_{trans \text{ lama}} \times \left(\frac{V_{sec \text{ lama}}}{V_{sec \text{ baru}}} \right)^2 \times \left(\frac{S_{lama}}{S_{baru}} \right)^2 \\ &= 0,125 \text{ pu} \times \left(\frac{20 \text{ kV}}{20 \text{ kV}} \right)^2 \times \left(\frac{60 \text{ MVA}}{60 \text{ MVA}} \right)^2 \\ &= j 0,125 \text{ pu} \end{aligned}$$

Untuk menghitung impedansi transformator urutan nol (Z_{trans0}) dapat menggunakan persamaan (7), seabgai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{trans0} &= 10 \times Z_{trans1} \\ &= 10 \times j0,125 \text{ pu} \\ &= j 1,25 \text{ pu} \end{aligned}$$

d) Menghitung Impedansi Penyulang

Impedansi penyulang Gardenia dapat dihitung menggunakan persamaan (8). Jenis konduktor yang digunakan pada penyulang ini adalah AAAC dengan luas penampang 150 mm^2 . Berdasarkan referensi pada Tabel III.1 (SPLN 64:1985, Tabel XIII B Impedansi kawat penghantar 20 kV), maka nilai impedansi saluran untuk urutan positif/negatif serta urutan nol yang digunakan, sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Impedansi urutan positif/negatif} &: 0,2162 + j0,3305 \Omega/\text{km} \\ \text{Impedansi urutan nol} &: 0,3631 + j1,6180 \Omega/\text{km} \end{aligned}$$

Perhitungan impedansi urutan positif/negatif pada penyulang Gardenia berdasarkan panjang penghantar 5,4 km, maka diperoleh nilai impedansinya ($Z_1 = Z_2$) yaitu :

$$\begin{aligned} Z_1 &= (0,2162 + j0,3305) \Omega/\text{km} \times 5,4 \text{ km} \\ &= (1,1674 + j1,7847) \Omega \end{aligned}$$

Konversi impedansi urutan positif/negatif pada penyulang Gardenia ke per unit (pu) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Z_{1pu} = \frac{Z_1}{Z_{dasar}} \text{ pu}$$

$$Z_{1pu} = \frac{(1,1674 + j1,7847)\Omega}{6,667 \Omega} \text{ pu}$$

$$= (0,1751 + j0,2677) \text{ pu}$$

Perhitungan impedansi urutan nol pada penyulang Gardenia berdasarkan panjang penghantar 5,4 km, maka diperoleh nilai impedansinya (Z_0) yaitu :

$$Z_0 = (0,3631 + j1,6180) \Omega/\text{km} \times 5,4 \text{ km}$$

$$= (1,9607 + j 8,7372) \Omega$$

Konversi impedansi urutan nol pada penyulang Gardenia ke per unit (pu) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Z_{0pu} = \frac{Z_0}{Z_{dasar}} \text{ pu}$$

$$Z_{0pu} = \frac{(1,9607 + j 8,7372) \Omega}{6,667 \Omega} \text{ pu}$$

$$= 0,2941 + j 1,3105 \text{ pu}$$

Perhitungan impedansi urutan positif/negatif pada bus 20 kV AR Taruna berdasarkan panjang penghantar 6 km, maka diperoleh nilai impedansinya ($Z_1 = Z_2$) yaitu :

$$Z_1 = (0,2162 + j0,3305) \Omega/\text{km} \times 6 \text{ km}$$

$$= (1,2972 + j1,983) \Omega$$

Konversi impedansi urutan positif/negatif pada bus 20 kV AR Taruna ke per unit (pu) menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Z_{1pu} = \frac{Z_1}{Z_{dasar}} \text{ pu}$$

$$Z_{1pu} = \frac{(1,2972 + j1,983) \Omega}{6,667 \Omega} \text{ pu}$$

$$= (0,1946 + j 0,2974) \text{ pu}$$

Perhitungan impedansi urutan nol pada bus 20 kV AR Taruna berdasarkan panjang penghantar 6 km, maka diperoleh nilai impedansinya (Z_0) yaitu :

$$Z_0 = (0,3631 + j1,6180) \Omega/\text{km} \times 6 \text{ km}$$

$$= (2,1786 + j9,708) \Omega$$

Konversi impedansi urutan nol pada bus 20 kV AR Taruna ke per unit (pu), menggunakan rumus sebagai berikut :

$$Z_{0pu} = \frac{Z_0}{Z_{dasar}} \text{ pu}$$

$$Z_{0pu} = \frac{(2,1786 + j9,708) \Omega}{6,667 \Omega} \text{ pu}$$

$$= (0,3268 + j 1,4561) \text{ pu}$$

- Penyulang Gardenia dan Bus 20 kV AR Taruna

Pada penyulang gardenia memiliki panjang penghantar 5,4 km, sedangkan Bus 20 kV AR Taruna memiliki panjang penghantar 6 km, untuk mencari urutan positif/negatif dan urutan nol yaitu jarak jaringan dikali impedansi kabel yang digunakan maka didapatlah hasil perhitungan impedansi penyulang gardenia dan Bus 20 kV AR Taruna sebagai berikut :

Tabel IV. 1 Impedansi Urutan Positif/Negatif penyulang Gardenia dan Bus 20 kV AR Taruna

Jarak (km)	Perhitungan (Ω/km)	Impedansi Urutan positif/negatif (Ω)	Impedansi Urutan positif/negatif per unit (pu)
------------	------------------------------------	---	--

(P. Gardenia) 5,4	$5,4 \times (0.2162 + j0.3305)$	$1,1674 + j1,7847$	$0,1752 + j0,2677$
(AR Taruna) 6	$6 \times (0.2162 + j0.3305)$	$1,2972 + j1,983$	$0,1946 + j0,2974$

Tabel IV. 2 Impedansi Urutan Nol Penyulang Gardenia dan Bus 20 kV AR Taruna

Jarak (km)	Perhitungan (Ω/km)	Impedansi Urutan Nol (Ω)	Impedansi Urutan Nol per unit (pu)
(Gardenia) 5,4	$5,4 \times (0,3631 + j1,6180)$	$1,9607 + j8,7372$	$0,2941 + j1,3105$
(AR Taruna) 6	$6 \times (0,3631 + j1,6180)$	$2,1786 + j9,708$	$0,3268 + j1,4561$

e) Menghitung Impedansi Ekuivalen

Untuk menghitung impedansi ekuivalen urutan positif dan negatif, digunakan persamaan (9). Sementara itu, perhitungan impedansi ekuivalen urutan nol mengacu pada persamaan (10). Dalam impedansi urutan nol, perlu diperhitungkan nilai resistansi rangkaian nol (RN) sebagai tambahan dalam persamaan. Berdasarkan data dari (tabel IV.1) di GI Sei Raya, nilai resistansi rangkaian nol tersebut adalah sebesar 40Ω , sehingga digunakan $RN = 40 \Omega$ dalam perhitungan.

Dengan menggunakan persamaan (9 dan 10) dilakukan perhitungan impedansi ekuivalen penyulang Gardenia dengan panjang jarak 5,4 km dan impedansi ekuivalen Bus 20 kV AR Taruna jarak 6 km, sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Impedansi Sumber } (Z_{\text{sumber}20\text{kV}(\text{pu})}) & : j2,8817 \text{ pu} \\
 \text{Impedansi Trafo } (Z_{\text{trans1}} = (Z_{\text{trans1}})) & : j0,125 \text{ pu} \\
 \text{Impedansi Trafo } (Z_{\text{trans0}}) & : j1,25 \text{ pu} \\
 \text{Penyulang Gardenia } (Z_1) & : (0,1751 + j0,2677) \text{ pu} \\
 \text{Penyulang Gardenia } (Z_0) & : (0,2941 + j1,3105) \text{ pu} \\
 \text{Bus 20 kV AR Taruna } (Z_1) & : (0,1946 + j0,2974) \text{ pu} \\
 \text{Bus 20 kV AR Taruna } (Z_0) & : (0,3268 + j1,4561) \text{ pu} \\
 \text{Resistansi Netral (RN)} & : 40 \Omega, \text{ konversi ke per unit (pu)} \\
 Z_{RN} & = \frac{RN}{Z_{\text{dasar}}} \text{ pu} \\
 & = \frac{40 \Omega}{6,667 \Omega} = 6 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Maka diperoleh impedansi ekuivalen urutan positif/negatif penyulang Gardenia jarak 5,4 km ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$), menggunakan persamaan (9) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Z_{1eq} & = Z_{\text{sumber}20\text{kV}(\text{pu})} + Z_{\text{trans12}} + Z_{\text{penyulang12}} \\
 Z_{1eq} & = j2,8817 \text{ pu} + j0,125 \text{ pu} + (0,1751 + j0,2677) \text{ pu} \\
 & = 0,1751 + j3,2744 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Impedansi ekuivalen urutan nol pada penyulang Gardenia jarak 5,4 km (Z_{0eq}) menggunakan persamaan (10) sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Z_{0eq} & = Z_{\text{sumber}20\text{kV}(\text{pu})} + Z_{\text{trans0}} + Z_{\text{penyulang0}} + (3 \times Z_{RN}) \\
 Z_{0eq} & = j2,8817 \text{ pu} + j1,25 \text{ pu} + (0,2941 + j1,3105) \text{ pu} + (3 \times 6) \\
 & = (0,2941 + j5,4422) \text{ pu} + 18 \\
 & = 18,2941 + j5,4422 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Impedansi ekivalen urutan positif/negatif pada bus 20 kV AR Taruna jarak 6 km ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$), menggunakan persamaan (9) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{1eq} &= Z_{sumber20kV(pu)} + Z_{trans12} + Z_{penyulang12} \\ Z_{1eq} &= j2,8817 \text{ pu} + j0,125 \text{ pu} + (0,1946 + j0,2974) \text{ pu} \\ &= 0,1946 + j3,3041 \text{ pu} \end{aligned}$$

Impedansi ekivalen urutan nol pada Bus 20 kV AR Taruna jarak 6 km (Z_{0eq}), menggunakan persamaan (10) sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Z_{0eq} &= Z_{sumber20kV(pu)} + Z_{trans0} + Z_{penyulang0} + (3 \times Z_{RN}) \\ Z_{0eq} &= j2,8817 \text{ pu} + j1,25 \text{ pu} + (0,3268 + j1,4561) \text{ pu} + (3 \times 6) \\ &= (0,3268 + j5,5878) \text{ pu} + 18 \\ &= 18,3268 + j5,5878 \text{ pu} \end{aligned}$$

- Impedansi Ekivalen Penyulang Gardenia dan Bus 20 kV AR Taruna
Dengan menggunakan persamaan (9 dan 10) diperoleh nilai impedansi ekivalen sebagai berikut :

Tabel IV. 3 Urutan Positif/Negatif Impedansi Ekivalen Penyulang Gardenia dan Bus 20 kV AR Taruna

Jarak (km)	Perhitungan (pu)	Impedansi ekivalen Urutan positif/negatif (pu)
Gardenia (5,4)	$j2,8817 + j0,125 + 0,1751 + j0,2677$	$0,1751 + j3,2744$
AR Taruna (6)	$j2,8817 + j0,125 + 0,1946 + j0,2974$	$0,1946 + j3,3041$

Tabel IV. 4 Urutan Nol Impedansi Ekivalen Penyulang Gardenia dan Bus 20 kV AR Taruna

Jarak (km)	Perhitungan (pu)	Impedansi ekivalen Urutan nol (pu)
Gardenia (5,4)	$j2,8817 + j1,25 + 0,2941 + j1,3105 + (3 \times 6)$	$18,2941 + j5,4422$
AR Taruna (6)	$j2,8817 + j1,25 + 0,3268 + j1,4561 + (3 \times 6)$	$18,3268 + j5,5878$

- f) Menghitung Arus Gangguan Hubung Singkat satu Fasa – Tanah (L-G)
Untuk mencari arus gangguan hubung singkat 1 fasa ke tanah dapat menggunakan persamaan (10) diperoleh hasil perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{Penyulang Gardenia jarak (5,4 km) } (Z_{1eq} = Z_{2eq}) &: (0,1751 + j3,2744) \text{ pu} \\ \text{Penyulang Gardenia jarak (5,4 km) } (Z_{0eq}) &: (18,2941 + j5,4422) \text{ pu} \\ \text{Bus 20 kV AR Taruna jarak (6 km) } (Z_{1eq} = Z_{2eq}) &: (0,1946 + j3,3041) \text{ pu} \\ \text{Bus 20 kV AR Taruna jarak (6 km) } (Z_{0eq}) &: (18,3268 + j5,5878) \text{ pu} \end{aligned}$$

$$V_{per\ unit\ (pu)} = 1\ pu = 1 + j0\ pu$$

Persamaan yang digunakan untuk menghitung arus hubung singkat 1 fasa-tanah, yaitu :

$$I_{SC(1\phi-N)} = \frac{3 \times V_{LN}}{2(Z_{1eq}) + Z_{0eq}}$$

Jadi perhitungan arus hubung singkat 1 fasa tanah pada penyulang Gardenia jarak 5,4 km, yaitu :

$$\begin{aligned} I_{SC(1\phi-N)} &= \frac{3 \times (1 + j0)}{2(0,1751 + j3,2744)\ pu + (18,2941 + j5,4422)}\ pu \\ &= \frac{3 + j0}{(0,3502 + j6,5488)\ pu + (18,2941 + j5,4422)}\ pu \\ &= \frac{3}{(18,6443 + j11,991)}\ pu \end{aligned}$$

Konversi hasilnya menjadi bentuk polar :

$$\begin{aligned} &= \frac{3 \angle 0^\circ}{(22,1674 \angle 32,76^\circ)}\ pu \\ &= 0,1353 \angle -32,76^\circ\ pu \end{aligned}$$

Konversi kembali hasil perhitungan hubung singkat 1 fasa-tanah penyulang gardenia jarak 5,4 km dari per unit(pu) ke ampere (A), yaitu hasil hubung singkat 1 fasa-tanah dikali arus dasar (I_{dasar}) :

$$\begin{aligned} &= (0,1353 \angle -32,76^\circ)\ pu \times 1732,05\ A \\ &= 234,346 \angle -32,76^\circ\ A \end{aligned}$$

perhitungan arus hubung singkat 1 fasa tanah pada Bus 20 kV AR Taruna yaitu :

$$\begin{aligned} I_{SC(1\phi-N)} &= \frac{3 \times (1 + j0)}{2(0,1946 + j3,3041)\ pu + (18,3268 + j5,5878)}\ pu \\ &= \frac{3 + j0}{(0,3892 + j6,6068)\ pu + (18,3268 + j5,5878)}\ pu \\ &= \frac{3}{(18,716 + j12,196)}\ pu \end{aligned}$$

Konversi hasilnya menjadi bentuk polar :

$$\begin{aligned} &= \frac{3 \angle 0^\circ}{(22,3390 \angle 33,09^\circ)}\ pu \\ &= 0,1343 \angle -33,09^\circ\ pu \end{aligned}$$

Konversi kembali hasil perhitungan hubung singkat 1 fasa-tanah Bus 20 kV AR Taruna jarak 6 km dari per unit (pu) ke ampere (A), yaitu hasil hubung singkat 1 fasa-tanah dikali arus dasar (I_{dasar}) :

$$\begin{aligned} &= (0,1343 \angle -33,09^\circ)\ pu \times 1732,05\ A \\ &= 232,614 \angle -33,09^\circ\ A \end{aligned}$$

g) Menghitung Arus Hubung Singkat Dua Fasa (L-L)

Untuk mencari arus hubung singkat 2 fasa – fasa dapat menggunakan persamaan (11) dilakukan perhitungan mencari nilai gangguan hubung singkat 2 fasa – fasa sebagai berikut:

Penyulang Gardenia jarak (5,4 km) ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$) : (0,1751 + j3,2744) pu

Bus 20 kV AR Taruna jarak (6 km) ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$) : (0,1946 + j3,3041) pu

$$V_{per\ unit\ (pu)} = 1\ pu = 1 + j0\ pu$$

Persamaan yang digunakan untuk menghitung arus hubung singkat 2 fasa, yaitu :

$$I_{SC(2\phi-N)} = \frac{V_{ph}}{2 \times Z_{1eq}}$$

Maka dilakukan perhitungan arus hubung singkat 2 fasa pada penyulang Gardenia yaitu :

$$\begin{aligned} I_{SC(2\phi-N)} &= \frac{\sqrt{3} \times (1 + j0)}{2 \times (0,1751 + j3,2744)}\ pu \\ &= \frac{1,732 + j0}{(0,3502 + j6,5488)}\ pu \end{aligned}$$

Konversi hasilnya menjadi bentuk polar :

$$= \frac{1,732 \angle 0^\circ}{(6,5582 \angle 86,94^\circ)} \text{ pu}$$

$$= 0,2641 \angle -86,94^\circ \text{ pu}$$

Konversi kembali hasil perhitungan hubung singkat 2 fasa pada penyulang Gardenia jarak 5,4 km dari per unit (pu) ke ampere (A), yaitu hasil hubung singkat 2 fasa dikali arus dasar (I_{dasar}) :

$$= (0,2641 \angle -86,94^\circ) \text{ pu} \times 1732,05 \text{ A}$$

$$= 457,434 \angle -86,94^\circ \text{ A}$$

Menghitung arus hubung singkat 2 fasa pada Bus 20 kV AR Taruna yaitu :

$$I_{SC(2\phi-N)} = \frac{\sqrt{3} \times (1+j0)}{2 \times (0,1946+j3,3041)} \text{ pu}$$

$$= \frac{1,732+j0}{(0,3892+j6,6082)} \text{ pu}$$

Konversi hasilnya menjadi bentuk polar :

$$= \frac{1,732 \angle 0^\circ}{(6,6197 \angle 86,63^\circ)} \text{ pu}$$

$$= 0,2616 \angle -86,63^\circ \text{ pu}$$

Konversi kembali hasil perhitungan hubung singkat 2 fasa pada Bus 20 kV AR Taruna jarak 5,4 km dari per unit (pu) ke ampere (A), yaitu hasil hubung singkat 2 fasa dikali arus dasar (I_{dasar}) :

$$= (0,2616 \angle -86,63^\circ) \times 1732,05 \text{ A}$$

$$= 453,104 \angle -86,63^\circ \text{ A}$$

h) Menghitung Arus Hubung Singkat Tiga Fasa (L-L-L)

Untuk mencari arus hubung singkat 3 Fasa – Fasa dapat menggunakan persamaan (12) dilakukan perhitungan untuk mencari nilai gangguan hubung singkat 3 fasa – fasa sebagai berikut :

Penyulang Gardenia jarak (5,4 km) ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$) : $(0,1751 + j3,2744) \text{ pu}$

Bus 20 kV AR Taruna jarak (6 km) ($Z_{1eq} = Z_{2eq}$) : $(0,1946 + j3,3041) \text{ pu}$

$$V_{per\ unit\ (pu)} = 1 \text{ pu} = 1 + j0 \text{ pu}$$

Persamaan yang digunakan untuk menghitung arus hubung singkat 3 fasa, yaitu :

$$I_{SC(3\phi)} = \frac{V}{Z_{1eq}}$$

Maka dilakukan perhitungan arus hubung singkat 3 fasa pada penyulang Gardenia yaitu :

$$I_{SC(3\phi)} = \frac{1+j0}{0,1751+j3,2744} \text{ pu}$$

Konversi hasilnya menjadi bentuk polar :

$$= \frac{1 \angle 0^\circ}{3,2791 \angle 86,94^\circ} \text{ pu}$$

$$= 0,305 \angle -86,94^\circ \text{ pu}$$

Konversi kembali hasil perhitungan hubung singkat 3 fasa pada penyulang Gardenia jarak 5,4 km dari per unit (pu) ke ampere (A), yaitu hasil hubung singkat 3 fasa dikali arus dasar :

$$= (0,305 \angle -86,94^\circ) \text{ pu} \times 1732,05 \text{ A}$$

$$= 528,275 \angle -86,94^\circ \text{ A}$$

Menghitung arus hubung singkat 3 fasa pada Bus 20 kV AR Taruna yaitu :

$$I_{SC(3\phi)} = \frac{1+j0}{(0,1946+j3,3041)} \text{ pu}$$

Konversi hasilnya menjadi bentuk polar:

$$= \frac{1 \angle 0^\circ}{3,3098 \angle 86,63^\circ} \text{ pu}$$

$$= 0,3021 \angle -86,63^\circ \text{ pu}$$

Konversi kembali hasil perhitungan hubung singkat 3 fasa pada Bus 20 kV AR Taruna jarak 5,4 km dari per unit (pu) ke ampere (A), yaitu hasil hubung singkat 3 fasa dikali arus dasar :

$$= (0,3021 \angle - 86,63^\circ) pu \times 1732,05 A$$

$$= 523,252 \angle - 86,63^\circ A$$

Tabel IV. 5 Hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat di setiap jarak penyulang Gardenia dan Bus 20 kV AR Taruna

Jarak Gangguan (km)	Arus Gangguan Hubung singkat (Ampere)		
	1 fasa-tanah	2 fasa	3 fasa
P.Gardenia (5,4 km)	234,346 $\angle - 32,76^\circ$	457,434 $\angle - 86,94^\circ$	528,275 $\angle - 86,94^\circ$
AR Taruna (6 km)	232,614 $\angle - 33,09^\circ$	453,104 $\angle - 86,63^\circ$	523,252 $\angle - 86,63^\circ$

i) Menghitung nilai setting Proteksi Penyulang Gardenia

Dalam penelitian ini, data yang diperoleh digunakan sebagai dasar untuk menentukan pengaturan sistem proteksi pada penyulang 20 kV, yaitu :

Tabel IV. 6 Data setting proteksi relay penyulang Gardenia 20 kV

Lokasi	GI Sei Raya
Busbar	1
Kubikel	Schneider
Feeder/Inc	Gardenia
Rasio CT Primer/ sekunder	300/5
Class	5P20
I > (A) Sekuder	5.0
I > (A) primer	300
TMS	0.10
I >> (A) Sekuder	33.3
I >> (A) primer	2000
t >>	0,05
Char. Curve	IEC SI
Merk Relay	Micom P127
No. Seri	36249638/09/13

Dari data tabel di atas, data yang digunakan untuk menentukan *setting* proteksi relay penyulang saat terjadi gangguan yaitu :

$$CT \text{ rasio} = 300/5 = 60:1$$

$$I_{pickup} = 300 A$$

$$I_{gangguan} = 528,275 A \text{ (hasil dari perhitungan arus gangguan hubung singkat 3 fasa)}$$

$$\text{Standard Inverse} = (\beta = 0,14, \alpha = 0,02) \text{ (merujuk pada Tabel III.2)}$$

Dengan nilai *Time Multiplier Setting* (TMS) yang sudah ditetapkan sesuai data penelitian yaitu 0,10 detik pada tingkat proteksi pertama (I>) penyulang Gardenia, maka perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai waktu kerja (t) pada tingkat proteksi pertama (I>) penyulang Gardenia, menggunakan persamaan (3.14), yaitu :

$$t = \frac{\beta \times TMS}{\left(\frac{I_{gangguan}}{I_{pickup}}\right)^\alpha - 1} \text{ detik}$$

$$t = \frac{0,14 \times 0,10}{\left(\frac{528,275}{300}\right)^{0,02} - 1} \text{ detik}$$

$$t = \frac{0,014}{0,0114} \text{ detik}$$

$$t = 1,228 \text{ detik}$$

Maka diperoleh nilai waktu kerja (t) pada tingkat proteksi pertama (I>) penyulang Gardenia yaitu 1,228 detik dengan *Time Multiplier Setting* (TMS) diatur sesuai data penelitian yaitu 0,10 detik (tabel IV.10).

Sedangkan pada tingkat proteksi kedua (I>>) penyulang Gardenia tidak aktif dikarenakan arus gangguan tidak cukup besar untuk memicu tingkat proteksi kedua (I>>) penyulang Gardenia untuk bekerja dan hanya tingkat proteksi pertama (I>) penyulang Gardenia yang bekerja.

j) Menghitung nilai *setting* AR Taruna

Dalam penelitian ini, data yang diperoleh digunakan sebagai dasar untuk menentukan pengaturan sistem proteksi AR Taruna yang mana itu adalah nama *Recloser* yang ada pada penyulang Gardenia, yaitu :

Tabel IV. 7 Data setting AR Taruna 20 kV pada penyulang Gardenia

Recloser	Taruna
Penyulang	Gardenia
Merk	ADVC
Beban Max (A)	131
Xln <i>Setting</i>	2.03
Rasio CT Primer/ sekunder	1000/1
I > (A) Sekuder	0.3
I > (A) primer	300
TMS	0.05
I >> (A) Sekuder	1.75
I >> (A) primer	1750
t>>	0,00
Char. Curve	INV255
Keterangan	Level 2

Dari data tabel di atas, data yang digunakan untuk menentukan *setting* AR Taruna saat terjadi gangguan yaitu :

$$\begin{aligned} \text{CT rasio} &= 1000/1 \\ I_{pickup} &= 300 \text{ A} \\ I_{gangguan} &= 523,252 \text{ A (hasil dari perhitungan arus gangguan 3 fasa)} \\ \text{Standard Inverse} &= (\beta = 0,14, \alpha = 0,02) \text{ (Tabel III.2)} \end{aligned}$$

Dengan nilai *Time Multiplier Setting* (TMS) yang sudah ditetapkan sesuai data penelitian yaitu 0,05 detik pada tingkat proteksi pertama (I >) AR Taruna, maka perlu dilakukan perhitungan untuk mengetahui nilai waktu kerja (t) pada tingkat proteksi pertama (I >) AR Taruna, menggunakan persamaan :

$$t = \frac{\beta \times TMS}{\left(\frac{I_{gangguan}}{I_{pickup}}\right)^\alpha - 1} \text{ detik}$$

$$t = \frac{0,14 \times 0,05}{\left(\frac{523,252}{300}\right)^{0,02} - 1} \text{ detik}$$

$$t = \frac{0,007}{0,0112} \text{ detik}$$

$$t = 0,625 \text{ detik}$$

Maka diperoleh nilai waktu kerja (t) pada tingkat proteksi pertama (I>) AR Taruna yaitu 0,625 detik dengan *Time Multiplier Setting* (TMS) yang sudah diatur sesuai data penelitian yaitu 0,05 detik (tabel IV.11).

Sedangkan pada tingkat proteksi kedua (I>>) AR Taruna tidak aktif dikarenakan arus gangguan tidak cukup besar untuk memicu tingkat proteksi kedua (I>>) AR Taruna untuk bekerja dan hanya tingkat proteksi pertama (I>) AR Taruna yang bekerja.

Tabel IV. 8 Perbandingan hasil uji selektivitas antara AR Taruna dan Penyulang Gardenia

Parameter	AR Taruna	Penyulang Gardenia
Tingkat proteksi aktif	I > (Proteksi Pertama)	I > (Proteksi Pertama)
Nilai TMS	0,05	0,10
Waktu Kerja (t) (detik)	0,625	1,228
Tingkat Proteksi Kedua (I >>)	Tidak Aktif	Tidak Aktif
Status selektivitas	Bekerja Lebih Cepat	Bekerja Sebagai Backup
Hasil Evaluasi	Sesuai Prinsip Selektivitas	Sesuai Prinsip Selektivitas

B. Analisa Hasil

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan maka diperoleh nilai analisis hasil pada penelitian ini yang terdapat pada Tabel IV.12, yang merupakan perbandingan uji selektivitas waktu hasil setting proteksi penyulang Gardenia dan AR Taruna. hasil perhitungan di atas dapat dilihat bahwa waktu kerja (t) pada AR Taruna (0,625 detik) dengan *Time Multiplier Setting* (TMS) (0,05 detik) lebih cepat dibandingkan waktu kerja (t) pada penyulang Gardenia (1,228 detik) dengan *Time Multiplier Setting* (TMS) (0,10). Hal ini menunjukkan bahwa koordinasi selektivitas antara kedua perangkat proteksi telah berjalan dengan baik, dimana AR Taruna lebih dekat dengan sumber gangguan akan bekerja terlebih dahulu dan memiliki waktu trip terlebih dahulu.

Dengan memiliki selisih waktu sekitar 0,603 detik, proteksi AR Taruna (downstream) merespon terlebih dahulu sebelum proteksi penyulang Gardenia (upstream) bekerja. Dengan demikian, uji selektivitas waktu antara AR Taruna dan penyulang Gardenia telah memenuhi prinsip selektivitas waktu dinyatakan dengan relay upstream memiliki waktu trip yang lebih lama dibanding relay downstream dengan selisih minimal 0,2-0,3 detik sebagai koordinasi margin sesuai standar IEC 60255-151 tentang perhitungan waktu trip berdasarkan *Time multiplier setting* dan arus pickup. Hal ini penting untuk membatasi area pemadaman dan memastikan kontinuitas pelayanan tenaga listrik.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian data recloser jaringan distribusi 20 kV pada penyulang Gardenia di GI Sei Raya, PT. PLN (Persero) Pontianak, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Besarnya arus hubung singkat yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh nilai impedansi, semakin besar nilai impedansi maka arus hubung singkat yang dihasilkan semakin kecil dan juga sebaliknya.
2. Recloser berfungsi secara otomatis membuka dan menutup kembali sirkuit beberapa kali

sesuai dengan pengaturan yang telah ditetapkan. Ketika terjadi gangguan sementara, recloser akan menutup kembali setelah jeda waktu tertentu untuk memberi kesempatan gangguan tersebut menghilang. Namun, jika gangguan bersifat permanen, recloser akan tetap terbuka sesuai dengan logika pengaturan yang telah ditentukan, kemudian masuk ke kondisi terkunci (lockout).

3. Pada penyulang Gardenia (5,4 km) hasil dari perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa-tanah adalah 234,349 A, arus gangguan hubung singkat 2 fasa adalah 457,434 A, dan arus gangguan hubung singkat 3 fasa adalah 528,275 A dan Bus 20 kV AR Taruna untuk hasil perhitungan arus gangguan hubung singkat 1 fasa-tanah adalah 232,614 A, arus gangguan hubung singkat 2 fasa adalah 453,104 A, arus gangguan hubung singkat 3 fasa adalah 523,252 A.
4. Pada uji selektivitas antara AR Taruna dan penyulang Gardenia, diperoleh hasil waktu kerja(t) AR Taruna sebesar 0,625 detik dengan Time Multiplier Setting (TMS) 0,05, lebih cepat dibandingkan waktu kerja(t) pada penyulang Gardenia sebesar 1,228 detik dengan Time Multiplier Setting (TMS) 0,10. Selisih waktu operasi sekitar 0,603 detik, memberikan margin selektivitas yang cukup aman antara proteksi AR Taruna (downstream) dan penyulang Gardenia (upstream).
5. Dengan waktu operasi yang lebih cepat, AR Taruna sebagai perangkat proteksi downstream berhasil merespon gangguan terlebih dahulu dibandingkan dengan penyulang Gardenia yang berfungsi sebagai proteksi upstream. Hal ini membuktikan bahwa prinsip selektivitas waktu yang telah tercapai dengan benar.
6. Untuk menghitung nilai setting AR Taruna di penyulang Gardenia menggunakan perhitungan Time Multiplier Setting (TMS) dan waktu kerja (t), di mana perhitungan Time Multiplier Setting (TMS) menggunakan "Standart Inverse" dalam rumusnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Alimuddin. (2017). Analisa kerja recloser untuk memproteksi jaringan distribusi di PT. PLN (Persero) Area Sorong. *Electro Luceat*, 3(1), 5. <https://doi.org/10.32531/jelekn.v3i1.26>
- Sri, S. (2021, Februari). Studi unjuk kerja recloser pada jaringan distribusi SUTM 20 KV penyulang Gunung Mas GI Pangkep. *Universitas Hasanuddin*, 44(8). <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>
- Irfan. (2018). Analisa penggunaan recloser pada jaringan distribusi 20 KV di GI Bulukumba (pp. 1–43). *Politeknik Negeri Ujung Pandang*.
- Azis, A., & Febrianti, I. K. (2019). Analisis sistem proteksi arus lebih pada penyulang Cendana Gardu Induk Bungaran Palembang. *Jurnal Ampere*, 4(2), 332. <https://doi.org/10.31851/ampere.v4i2.3468>
- Wato, I. (2017). Studi penggunaan recloser pada jaringan distribusi 20 KV di PT. PLN (Persero) Area Yogyakarta. *Jurnal Elektrikal*, 4(1), 1–9. <https://doi.org/10.34151/jurnalelektrikal.v4i1>
- Silaban, A. (2009). Studi tentang penggunaan recloser pada sistem jaringan distribusi 20 KV (Vol. 55, pp. 1–55). *Universitas Sumatera Utara*.
- Aryanto, N., & Balkis, M. (2021). Tinjauan gangguan jaringan distribusi 20 KV penyulang Muara Aman PT. PLN (Persero) ULP Rayon Muara Aman. *jTERAF*, 1(1), 1–7.
- Widodo. (2012). Metode pengaturan penggunaan tenaga listrik dalam upaya penghematan bahan bakar pembangkit dan energi. *Waktu: Jurnal Teknik UNIPA*, 10(2), 39–44. <https://doi.org/10.36456/waktu.v10i2.859>
- Putra, A., & Firdaus, F. (2017). Analisa penggunaan recloser untuk pengaman arus lebih pada jaringan distribusi 20 KV Gardu Induk Garuda Sakti. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, 4(1), 1–10.
- Putra, L. A. (2015). Studi koordinasi proteksi pada sistem kelistrikan PT. Pertamina RU. IV Balongan. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*, 2(1), 96.
- Firdausi, M. (2015). Analisis koordinasi rele arus lebih dan penutup balik otomatis (recloser) pada

penyulang Junrejo 20 KV Gardu Induk Sengkaling akibat gangguan arus hubung singkat.
Jurnal Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Brawijaya, 3(1), 2.
SPLN 64:1985. (1985). Standar proteksi sistem distribusi.
SPLN D3.016-1:2014. (2014). Standar pengaturan proteksi sistem tenaga listrik.