

PENGUJIAN KOORDINASI RELAY ARUS LEBIH DAN GANGGUAN TANAH SEBAGAI PROTEKSI DAN KEAMANAN DALAM KUBIKEL 20 KV PADA SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Adam El Mukti Alifino¹⁾, Joko²⁾, Tri Rijanto³⁾, Tri Wrahatnolo⁴⁾

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, 60231, Indonesia

Email: adamel.20046@mhs.unesa.ac.id¹⁾, joko@unesa.ac.id²⁾, tririjanto@unesa.ac.id³⁾, triwrahatnolo@unesa.ac.id⁴⁾

Abstract

In line with the increasing demand for electricity, developments in the electrical system are urgently needed. Several factors that need to be considered are related to the protection and safety systems used to minimize short circuit disturbances and work accidents. One of the protection systems used is a relay. When using relays in an electric power distribution system, it is necessary to test the coordination between one relay and another in order to protect and secure the system optimally. This research aims to describe the results of testing the coordination of overcurrent relays and ground fault relays and create a simulation program using the Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) Power Station 19.0.1 software, as well as analyzing the performance of the installed relays. From the results of this research, it was found that at the 150 kV South Surabaya substation, transformer 2, Mangrove feeder has a relay with the performance of giving the command to open the power breaker in accordance with International Electrotechnical Commission (IEC) 60255 standards regarding the use of protective relays.

Article History

Submitted: 6 Juli 2024

Accepted: 11 Juli 2024

Published: 12 Juli 2024

Key Words

Coordination Testing, Over Current Relay, Ground Fault Relay, Short Circuit Faults, ETAP

Abstrak

Sejalan dengan bertambahnya kebutuhan listrik, maka perkembangan terhadap sistem kelistrikan sangat dibutuhkan. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan adalah terkait sistem proteksi dan keamanan yang digunakan untuk meminimalisir gangguan hubung singkat dan kecelakaan kerja. Salah satu sistem proteksi yang digunakan adalah relay. Dalam penggunaan relay pada sistem distribusi tenaga listrik diperlukan pengujian koordinasi antara relay satu dengan yang lainnya agar dapat melindungi dan mengamankan sistem secara maksimal. Penelitian ini bertujuan untuk menguraikan hasil pengujian koordinasi relay arus lebih dan relay gangguan tanah dan membuat simulasi program menggunakan software Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) Power Station 19.0.1, serta menganalisis kinerja dari relay yang terpasang. Dari hasil penelitian ini didapatkan bahwa pada gardu induk 150 kV Surabaya Selatan, transformator 2, penyulang Mangrove memiliki relay dengan kinerja memberikan perintah untuk membuka pemutus tenaga sesuai dengan standar International Electrotechnical Commission (IEC) 60255 terkait penggunaan relay proteksi.

Sejarah Artikel

Submitted: 6 Juli 2024

Accepted: 11 Juli 2024

Published: 12 Juli 2024

Kata Kunci

Pengujian Koordinasi, Relay Arus Lebih, Relay Gangguan Tanah, Gangguan Hubung Singkat, ETAP

PENDAHULUAN

Dalam Revolusi Industri 4.0, listrik menjadi kebutuhan utama untuk menggerakkan peralatan dan mesin di seluruh dunia, sehingga diperlukan peningkatan kualitas distribusi energi listrik ke industri dan konsumen. Pemanfaatan listrik yang terus-menerus dalam industri, perkantoran, rumah tangga, dan transportasi menjadikannya sangat dibutuhkan oleh banyak kalangan [1].

Seiring meningkatnya kebutuhan listrik, perkembangan sistem tenaga listrik tidak dapat dihindari, menyebabkan jaringan sistem tenaga listrik semakin rinci dan kompleks, sehingga diperlukan pengendalian jaringan yang baik untuk memudahkan pendistribusian tenaga listrik.

Sistem distribusi tenaga listrik berperan penting dalam menyalurkan tenaga listrik dari gardu induk atau gardu distribusi kepada konsumen dengan mutu pelayanan yang memadai melalui jaringan SUTM (Saluran Udara Tegangan Menengah) dan SKTM (Saluran Kabel Tegangan Menengah) [2].

Peralatan pendukung seperti kubikel tegangan menengah 20 kV sangat diperlukan sebagai media penghubung, pemutus, pembagi, dan pengontrol aliran daya listrik [3]. Jaringan distribusi tenaga listrik harus dirancang dengan baik untuk masa depan dan didukung oleh investasi yang memadai agar dapat terintegrasi dengan peralatan berkualitas tinggi.

Sistem distribusi merupakan komponen yang paling rentan terhadap gangguan, sehingga pemeliharaan yang sesuai dengan jadwal sangat penting untuk menjaga keberlangsungan penyaluran tenaga listrik. Pemeliharaan sistem distribusi tenaga listrik memerlukan SOP dan perencanaan yang tepat untuk menghindari kesalahan fatal.

Gangguan pada sistem distribusi sering disebabkan oleh sambaran petir, hubung singkat, pelepasan beban mendadak, dan beban berlebih, yang dapat mengakibatkan arus lebih atau *over current* [4]. Gangguan ini harus diminimalisir dan diperbaiki menggunakan sistem proteksi yang sesuai, seperti pentanahan, *Lightning Arrester* (LA), *Fuse Cut Out* (FCO), dan Relay.

Relay berfungsi mengatur dan memutus rangkaian listrik secara otomatis saat terdeteksi kondisi tidak normal, memberikan indikasi bahaya berupa alarm atau membuka pemutus tenaga (PMT) atau *Circuit Breaker* (CB). Sistem proteksi yang efektif sangat penting untuk menjaga penyaluran listrik yang baik dan aman [5].

Penelitian oleh Tareq Foqha et al. (2024) berjudul "*Optimization Techniques for Directional Overcurrent Relay Coordination: A Comprehensive Review*" membahas teknik optimisasi untuk relay arus lebih terarah secara komprehensif [6]. Sementara penelitian oleh Talal Elemamali Sati et al. (2023) berjudul "*Harmonic Dual – Setting Directional Overcurrent Protection for Inverter – Based Islanded Microgrids*" membahas pengaturan ganda harmonik pada *microgrid* berbasis *inverter* untuk perlindungan arus lebih terarah [7].

Penelitian ini menggunakan metode simulasi dengan software *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP) *Power Station* 19.0.1 untuk memodelkan pengujian koordinasi relay secara terkontrol dan terperinci. Tujuan penelitian adalah menganalisis pemanfaatan relay sebagai sistem proteksi dalam kubikel tegangan menengah 20 kV pada sistem distribusi tenaga listrik, serta meninjau aspek – aspek penting dalam koordinasi relay.

TEORI

A. Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi tenaga listrik adalah salah satu komponen dari Sistem Tenaga Listrik. Sistem distribusi tenaga listrik memiliki daerah kerja mulai dari pemutus tenaga incoming pada gardu induk (GI) sampai alat penghitung dan pembatas (APP) pada instalasi listrik konsumen [8].

B. Kubikel Tegangan Menengah

Kubikel tegangan menengah adalah perangkat listrik yang dipasang di gardu induk, gardu distribusi, atau gardu hubung dan menjadi elemen utama dalam sistem distribusi tenaga listrik. Kubikel ini umumnya memiliki kombinasi peralatan switching, pemutus, pemisah, pengontrol, pengukuran, proteksi, dan pengatur [3]. Kubikel tegangan menengah dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Kubikel Tegangan Menengah [9]

C. Gangguan Hubung Singkat

Menurut standar IEC 60909, gangguan hubung singkat didefinisikan sebagai terbentuknya jalur penghubung, baik secara sengaja maupun tidak sengaja, antara dua atau lebih bagian penghantar listrik atau konduktor listrik, menyebabkan perbedaan tegangan di antara penghantar – penghantar tersebut menjadi nol atau mendekati nol. Hubung singkat, atau korsleting listrik, dapat mengakibatkan arus lebih “*over current*” yang nilainya bisa mencapai ratusan hingga ribuan kali lebih besar daripada arus normal dalam waktu singkat [10].

D. Sistem Proteksi dan Keamanan

Sistem Proteksi dan Keamanan adalah sistem yang dibentuk untuk melindungi dan menjaga keamanan peralatan dari kondisi tidak normal atau gangguan yang dapat menyebabkan kerusakan atau kerugian. Sistem ini terdiri dari perangkat pengaman utama dan pendukung, dengan saklar dan fuse sebagai elemen kunci dalam distribusi tenaga listrik untuk melindungi peralatan kelistrikan [11].

E. Relay Arus Lebih

Relay arus lebih atau *Over Current Relay* (OCR) adalah relay yang beroperasi ketika arus listrik melewati batas nominal yang telah ditentukan. OCR berfungsi sebagai pelindung utama dalam jaringan distribusi, transformator kecil, cadangan untuk transformator besar, generator kecil, dan motor.

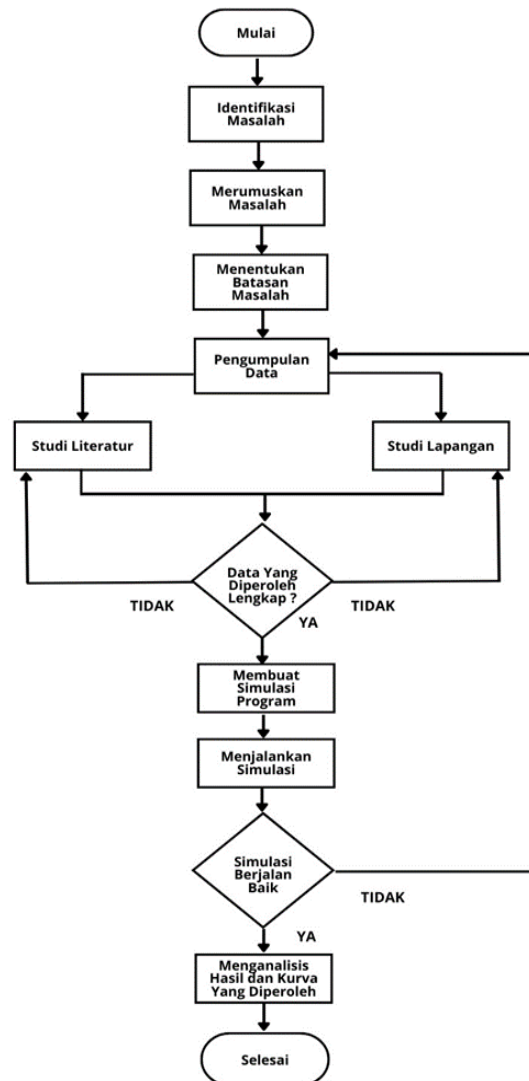
Penggunaan OCR memiliki keuntungan seperti biaya yang relatif murah, kemudahan pengaturan, kemampuan berfungsi sebagai relay utama dan cadangan, serta perlindungan terhadap gangguan hubung singkat antar fasa maupun satu fasa ke tanah [12].

F. Relay Gangguan Tanah

Relay Gangguan Tanah atau *Ground Fault Relay* (GFR) melindungi peralatan atau jaringan listrik tegangan menengah dari gangguan fasa atau 3 fasa, dan hanya beroperasi satu arah karena tidak dapat membedakan arah arus gangguan. GFR berfungsi sebagai pengaman cadangan untuk *Directional Ground Relay* (DGR). Perbedaan dengan DGR adalah GFR tidak memiliki arah [13].

METODE

Untuk menguji koordinasi relay arus lebih dan relay gangguan tanah sebagai proteksi dan keamanan dalam kubikel 20 kV pada sistem distribusi tenaga listrik, diperlukan beberapa tahapan penelitian. Tahapan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2 Tahapan Penelitian

A. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif, yang merupakan pendekatan ilmiah yang sistematis terhadap fokus penelitian. Pendekatan ini dilakukan dengan mengumpulkan data dan teori yang relevan mengenai "Pengujian Koordinasi Relay Arus Lebih Dan Relay Gangguan Tanah Sebagai Proteksi Dan Keamanan Dalam Kubikel 20 kV Pada Sistem Distribusi Tenaga Listrik". Penelitian ini memerlukan metode dan analisis yang teliti untuk memastikan hasil sesuai dengan asumsi yang diharapkan, dengan fokus pada metode simulasi.

B. Jenis – Jenis Data Penelitian

Data penelitian sangat dibutuhkan untuk menunjang keberhasilan penelitian ini. Dalam penelitian ini membutuhkan beberapa jenis data yaitu:

1. Data letak dan posisi Relay
2. Data Power Grid
3. Data Busbar / Rel
4. Data Transformator

5. Data Circuit Breaker (CB)
6. Data Penyulang
7. Data Relay Arus Lebih
 - a. Relay Arus Lebih Sisi Incoming
 - b. Relay Arus Lebih Sisi Outgoing
8. Data Relay Gangguan Tanah
 - a. Relay Gangguan Tanah Sisi Incoming
 - b. Relay Gangguan Tanah Sisi Outgoing
9. Data Teknis Penghantar.

C. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini membutuhkan data – data yang relevan agar mendapatkan hasil yang tepat dan sesuai. Dalam penelitian ini digunakan beberapa metode, yaitu:

1. Studi Literatur

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan menggunakan berbagai sumber referensi seperti jurnal, artikel, buku, dan karya ilmiah untuk mendapatkan teori dan data yang relevan. Pendekatan ini memfasilitasi penyusunan penelitian dan mempermudah pemahaman pembaca terhadap teori dan data yang disajikan.

2. Metode Observasi

Penelitian ini melakukan observasi langsung terhadap objek penelitian untuk memperkuat pemahaman teori, melalui studi lapangan dan wawancara dengan pihak terkait.

3. Metode Simulasi

Penelitian ini menggunakan simulasi untuk menguji objek penelitian setelah melakukan studi literatur dan observasi langsung. Metode ini bertujuan untuk memperkuat dan menguji teori yang telah dipahami sebelumnya.

D. Teknik Analisa Data.

Penelitian ini melibatkan pembuatan simulasi program dengan parameter yang ditentukan. Hasil simulasi ini mencakup nominal arus kerja dan waktu kerja dari relay yang dikordinasikan. Selanjutnya, hasil tersebut dianalisis dengan menggunakan standar *International Electrotechnical Commission* (IEC) 60909 untuk gangguan hubung singkat dan IEC 60255 untuk relay yang digunakan [4], [14]. Standar ini sesuai dengan jenis dan karakteristik relay yang diuji serta manufaktur yang mengacu pada IEC dalam standarnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Sistem Kelistrikan

Pada penelitian ini, sistem kelistrikan yang dibahas adalah sisi incoming 20 kV hingga sisi outgoing 20 kV dari penyulang Mangrove, transformator 2, gardu induk Surabaya Selatan. Dalam simulasi ini, standard yang digunakan adalah *International Electrotechnical Commission* (IEC) – 50 hz [15]. Beberapa data teknis yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Data *Power Grid*

Data *Power Grid* yang digunakan ini bersifat konstan (*fixed category*). Data *Power Grid* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel I berikut ini.

Tabel I
Data Power Grid

Data Power Grid	
Nominal Tegangan	150 Kv
Jumlah Fasa	3 Fasa

2. Data Busbar / Rel

Data busbar / rel yang digunakan dapat dilihat pada Tabel II berikut ini.

Tabel II
Data Busbar / Rel

Data Busbar / Rel		
Busbar / Rel 150 kV	Nominal Tegangan	150 kV
	Jumlah Fasa	3 Fasa
	Persentase Tegangan	100 %
Busbar / Rel 150 kV	Nominal Tegangan	20 kV
	Jumlah Fasa	3 Fasa
	Persentase Tegangan	100 %

3. Data Transformator Step Down

Data Transformator step down yang digunakan dapat dilihat pada Tabel III berikut ini.

Tabel III
Data Transformator Step Down

Data Transformator <i>Step Down</i>		
Manufaktur / Pabrikasi		Pauwels
Nominal Daya		60 mVA
Impedansi (%)		12,178 %
Jumlah fasa		3 Fasa
Hubungan Belitan		YNynO+d
Nominal Tegangan	Primer	150 kV
	Sekunder	20 kV
Nominal Arus	Primer	231 A
	Sekunder	1732 A
Tap (%)	Primer	0%
	Sekunder	0%

4. Data Relay

Data relay yang digunakan dapat dilihat pada Tabel IV berikut ini.

Tabel IV
Data Relay

Data Relay		
Relay Incoming	Manufaktur	Alstom
	Brand	MiCOM
	Tipe / Model	P142
	Fungsional	OCR & GFR
Relay Outgoing	Manufaktur	Alstom
	Brand	MiCOM
	Tipe / Model	P142
	Fungsional	OCR & GFR

5. Data Pemutus Tenaga

Data pemutus tenaga yang digunakan dapat dilihat pada Tabel V berikut ini.

Tabel V
Data Pemutus Tenaga

Data Pemutus Tenaga	
Manufaktur / Pabrikan	ABB
Tipe / Model	HD4-HPA24
Jenis	HVCB
Nominal Tegangan	20 Kv
Nominal Arus	2000 A
Nominal Arus Puncak	25 kA

6. Data Transformator Arus

Data transformator arus yang digunakan dapat dilihat pada Tabel VI berikut ini.

Tabel VI
Data Transformator Arus

Tabel VI Data Transformator Arus Data Transformator Arus		
Incoming	Nominal Primer	2000 A

	Nominal Sekunder	5 A
	Rasio Arus	2000 / 5
	Rasio (%)	400 %
	Desain	5P20
	Burden	30 VA
Outgoing	Nominal Primer	200 A ~ 600 A
	Nominal Sekunder	5 A
	Rasio Arus	200 / 5 ~ 600 / 5
	Rasio (%)	40 % ~ 120 %
	Desain	5P20
	Burden	30 A

7. Data Teknis Penghantar

Data teknis penghantar yang digunakan dapat dilihat pada Tabel VII berikut ini.

Tabel VII
Data Teknis Penghantar

Data Teknis Penghantar		
Jenis Penghantar		AAAC
Luas Penampang		240 mm
Positif	Resistansi (R)	0,02834
	Reaktansi (X)	0,20448
Negatif	Resistansi (R)	0,02462
	Reaktansi (X)	0,20461
Nol	Resistansi (R)	0,10416
	Reaktansi (X)	0,36867

8. Penyulang

Data penyulang yang digunakan dapat dilihat pada Tabel VIII berikut ini.

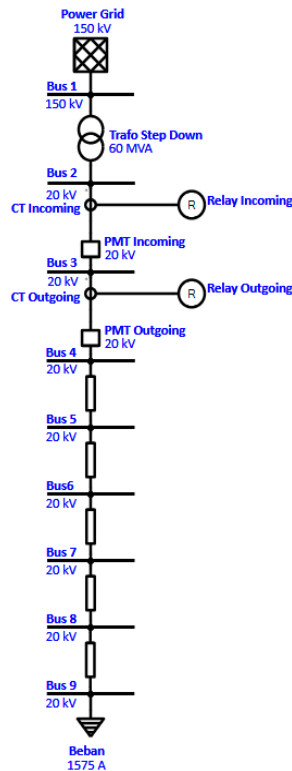
Tabel VIII
Data Penyulang

Data Penyulang	
Nama Penyulang	Penyulang Mangrove
Panjang Saluran	13,207 km

Nominal Arus Maksimal	180 A
Nominal Beban	1,037 mVA

B. Diagram Garis Tunggal

Diagram garis tunggal atau “single line diagram” dapat dilihat pada Gambar 3 berikut ini.

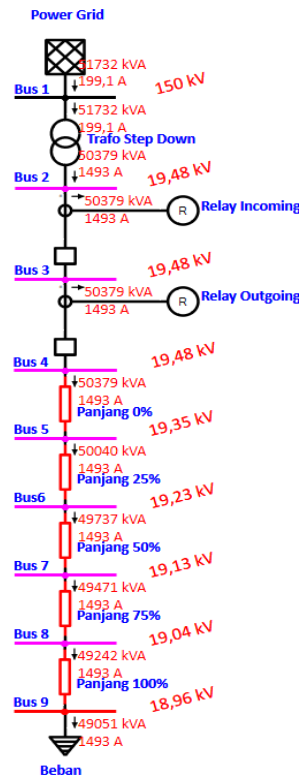


Gambar 3. Single Line Pada ETAP

Penelitian ini dilakukan untuk memaksimalkan koordinasi relay arus lebih dan relay gangguan tanah sebagai sistem proteksi dan keamanan terhadap arus gangguan hubung singkat pada sistem distribusi tenaga listrik.

C. Analisa Aliran Daya

Analisa aliran daya dapat dilakukan setelah pembuatan single line diagram dari sistem kelistrikan dan menggunakan fitur “Load Flow Analysis” seperti yang terlihat pada Gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Simulasi Analisa Aliran Daya

Analisa aliran daya (*Load Flow Analysis*) adalah menguraikan besarnya nominal tegangan, arus dan daya yang mengalir pada setiap komponen sistem kelistrikan yang dianalisa. Hasil dari analisa aliran daya dapat dilihat pada Tabel IX berikut ini.

Tabel IX
Hasil Analisa Aliran Daya

Hasil Analisa Aliran Daya		
Sub – Sistem	Nominal Daya	
Power Grid	51,73 mVA	
Transformator Step Down (2 – Winding)	51,73 mVA / 50,37 mVA	
Incoming	50,37 mVA	
Outgoing	50,37 mVA	
Panjang Saluran	0 %	50,04 mVA
	25 %	49,73 mVA
	50 %	49,47 mVA
	75 %	49,24 mVA
	100 %	49,05 mVA

Berdasarkan Tabel IX menunjukkan nominal daya sumber pada sisi pangkal (incoming dan outgoing) penyulang Mangrove adalah sebesar 51,73 mVA dan sebesar 49,05 mVA pada panjang akhir saluran penyulang. Analisa Aliran Daya juga dapat menampilkan analisa aliran tegangan yang dapat dilihat pada Tabel X berikut ini.

Tabel X
Hasil Analisa Aliran Tegangan

Hasil Analisa Aliran Tegangan		
Sub – Sistem	Nominal Tegangan	
Power Grid	150 kV	
Transformator Step Down (2 – Winding)	150 kV/ 20 kV	
<i>Incoming</i>	19,48 kV	
<i>Outgoing</i>	19,48 kV	
Panjang Saluran	0 %	19,35 kV
	25 %	19,23 kV
	50 %	19,13 kV
	75 %	19,04 kV
	100 %	18,96 kV

Berdasarkan Tabel X menunjukkan nominal tegangan pada sisi pangkal (*incoming* dan *outgoing*) penyulang Mangrove adalah sebesar 19,48 KV dari nilai existing sebesar 20 KV menunjukkan persentase rugi tegangan (*voltage loss*) sebesar 2,6%. Nilai ini masih diambang wajar dan sistem tetap dapat mendistribusikan tenaga listrik secara maksimal.

Analisa Aliran Daya juga dapat menampilkan analisa aliran arus yang dapat dilihat pada Tabel XI berikut ini

Tabel XI
Hasil Analisa Aliran Arus

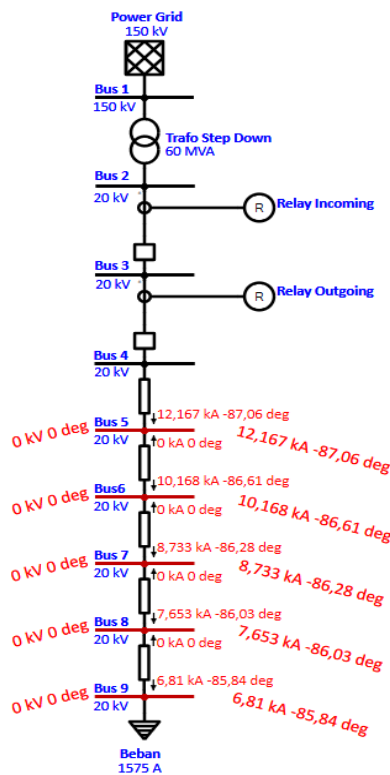
Hasil Analisa Aliran Arus		
Sub – Sistem	Nominal Arus	
Power Grid	199,1 A	
Transformator Step Down (2 – Winding)	199,1 A / 1493 A	
<i>Incoming</i>	1493 A	
<i>Outgoing</i>	1493 A	
Panjang Saluran	0 %	1493 A
	25 %	1493 A
	50 %	1493 A
	75 %	1493 A
	100 %	1493 A

Berdasarkan Tabel XI menunjukkan nominal arus *interrupt* penyulang Mangrove adalah sebesar 1493 A.

D. Analisa Hubung Singkat

Analisa gangguan hubung singkat dilakukan untuk mengetahui nominal arus dari hubung singkat [38], [43]. Analisa gangguan hubung singkat yang dilakukan berupa

simulasi dengan menggunakan fitur “Short Circuit Analysis” yang dapat terlihat pada Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Simulasi Hubung Singkat

Setelah dilakukan simulasi gangguan hubung singkat, akan didapatkan nominal arus hubung singkat pada titik 0% hingga 100% dari total panjang penyulang Mangrove pada sisi outgoing transformator 2, gardu induk 150 KV Surabaya Selatan yaitu sepanjang 13,207 Km.

Hasil dari analisa gangguan hubung singkat dapat dilihat pada Tabel XII berikut ini.

Tabel XII
Hasil Analisa Gangguan Hubung Singkat

Hasil Analisa Gangguan Hubung Singkat				
Jarak	Jenis Hubung Singkat			
	3 Fasa	2 Fasa	2 Fasa ke Tanah	1 Fasa ke Tanah
0 %	12,167 kA	10,537 kA	12,243 Ka	12,053 kA
25 %	10,168 kA	8,806 kA	10,101 kA	9,659 kA
50 %	8,733 kA	7,563 kA	8,603 kA	8,057 kA
75 %	7,653 kA	6,628 kA	7,495 kA	6,910 kA

100	6,810	5,898	6,641	6,049
%	kA	kA	kA	kA

Berdasarkan Tabel XII menunjukkan nilai arus hubung singkat hasil simulasi pada software ETAP Power Station 19.0.1 akan semakin kecil mengikuti panjang saluran.

E. Koordinasi Relay Arus Lebih

Koordinasi relay arus lebih pada sisi *incoming* dan sisi *outgoing* membutuhkan perhitungan yang kompleks agar relay dapat bekerja secara tepat sesuai dengan urutan standar yang telah ditentukan. Penentuan koordinasi waktu kerja berdasarkan *grading time* (t) antar proteksi sesuai standar IEC 60255 sebesar 0,5 detik hingga 0,3 detik [14]. Karakteristik relay yang terpasang adalah *Standard Inverse* (SI) dengan masing – masing nilai konstanta (K) dan (α) berturut – turut adalah sebesar 0,14 dan 0,02.

1. Relay Arus Lebih Sisi *Incoming*

Berikut adalah koordinasi relay arus lebih sisi *incoming*.

a. Setting Arus

Terdapat 2 nilai setting arus yang harus ditentukan yaitu nilai setting arus primer dan nilai setting arus sekunder.

$$\begin{aligned} I_{\text{set (primer)}} &= I_{\text{set (150 kV)}} \\ &= 1,05 \times 231 \\ &= 242,55 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{set (sekunder)}} &= I_{\text{set (primer)}} \times \frac{1}{\text{rasio CT incoming}} \\ &= 242,55 \times \frac{1}{2000/5} \\ &= 0,6063 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{set (pick up)}} &= \frac{I_{\text{set (primer)}}}{I_{\text{set (primer CT)}}} \\ &= \frac{242,55}{2000} \\ &= 0,12127 \text{ A} \end{aligned}$$

b. Setting Waktu

Setting waktu yang digunakan adalah TMS (*Time Multiplier Setting*) / TD (*Time Dial*) dan diperlukan nominal arus hubung singkat tiga fasa pada jarak 0% dari panjang penyulang.

$$\begin{aligned} \text{TMS} = \text{TD} &= t \times \frac{\left(\frac{I_{\text{hs 3 fasa(0\%)}}}{I_{\text{set (primer)}}}\right)^{\alpha} - 1}{K} \\ &= 0,5 \times \frac{\left(\frac{12167}{242,55}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \\ &= 0,290 \text{ s} \end{aligned}$$

2. Relay Arus Lebih Sisi *Outgoing*

Berikut adalah koordinasi relay arus lebih sisi *outgoing*.

a. Setting Arus

Terdapat 2 nilai setting arus relay arus lebih yang harus ditentukan yaitu nilai setting arus primer dan nilai setting arus sekunder.

$$\begin{aligned} I_{\text{set (primer)}} &= I_{\text{set (150 KV)}} \\ &= 1,05 \times I_{\text{(penyulang)}} \\ &= 1,05 \times 180 \\ &= 189 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{set (sekunder)}} &= I_{\text{set (primer)}} \times \frac{1}{\text{rasio CT outgoing}} \\ &= 189 \times \frac{1}{600/5} \\ &= 1,575 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{set (pick up)}} &= \frac{I_{\text{set (primer)}}}{I_{\text{set (primer CT)}}} \\ &= \frac{189}{600} \\ &= 0,315 \text{ A} \end{aligned}$$

b. Setting Waktu

Setting waktu yang digunakan adalah TMS (*Time Multiplier Setting*) / TD (*Time Dial*) dan diperlukan nominal arus hubung singkat tiga fasa pada jarak 0% dari panjang penyulang. Berikut adalah nominal setting waktu:

$$\begin{aligned} \text{TMS} = \text{TD} &= t \times \frac{\left(\frac{I_{\text{hs 3 fasa(0\%)}}}{I_{\text{set (primer)}}}\right)^{\alpha} - 1}{K} \\ &= 0,3 \times \frac{\left(\frac{12167}{189}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \\ &= 0,186 \text{ s} \end{aligned}$$

F. Koordinasi Relay Gangguan Tanah

Koordinasi relay gangguan tanah pada sisi *incoming* dan sisi *outgoing* membutuhkan perhitungan yang kompleks agar relay dapat bekerja secara tepat sesuai dengan urutan standar yang telah ditentukan. Penentuan koordinasi waktu kerja berdasarkan *grading time* (t) antar proteksi sesuai standar IEC 60255 sebesar 0,5 detik hingga 0,3 detik.

Karakteristik relay yang terpasang adalah *Standard Inverse* (SI) dengan masing – masing nilai konstanta (K) dan (α) berturut – turut adalah sebesar 0,14 dan 0,02. Berikut adalah koordinasi relay gangguan tanah pada sisi *incoming* dan *outgoing*.

1. Relay Gangguan Tanah Sisi *Incoming*.

Berikut adalah koordinasi relay gangguan tanah sisi *incoming*.

a. Setting Arus

Terdapat 2 nilai setting arus yang harus ditentukan yaitu nilai setting arus primer dan nilai setting arus sekunder.

$$\begin{aligned} I_{\text{set (primer)}} &= 0,1 \times I_{\text{hs 1 fasa (100\%)}} \\ &= 0,1 \times 6049 \\ &= 604,9 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{set (sekunder)}} &= I_{\text{set (primer)}} \times \frac{1}{\text{rasio CT incoming}} \\ &= 604,9 \times \frac{1}{2000/5} \\ &= 1,512 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{set (pick up)}} &= \frac{I_{\text{set (primer)}}}{I_{\text{set (primer CT)}}} \\ &= \frac{604,9}{2000} \\ &= 0,30245 \text{ A} \end{aligned}$$

b. Setting Waktu

Setting Waktu yang digunakan adalah TMS (*Time Multiplier Setting*) / TD (*Time Dial*) dan diperlukan nominal arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada jarak 0% dari panjang penyulang.

$$\begin{aligned}
 TMS = TD &= t \times \frac{\left(\frac{I_{hs\ 1\ fasa(0\%)}^a}{I_{set\ (primer)}}\right)^a - 1}{K} \\
 &= 0,5 \times \frac{\left(\frac{12053}{604,9}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \\
 &= 0,220\ s
 \end{aligned}$$

2. Relay Gangguan Tanah Sisi *Outgoing*.

Berikut adalah koordinasi relay gangguan tanah sisi *incoming*.

a. Setting Arus

Terdapat 2 nilai setting arus yang harus ditentukan yaitu nilai setting arus primer dan nilai setting arus sekunder. Berikut adalah nominal setting arus:

$$\begin{aligned}
 I_{set\ (primer)} &= 0,1 \times I_{hs\ 1\ fasa\ (100\%)} \\
 &= 0,1 \times 6049 \\
 &= 604,9\ A
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{set\ (sekunder)} &= I_{set\ (primer)} \times \frac{1}{\text{rasio CT outgoing}} \\
 &= 604,9 \times \frac{1}{200/5} \\
 &= 15,112\ A
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{set\ (pick\ up)} &= \frac{I_{set\ (primer)}}{I_{set\ (primer\ CT)}} \\
 &= \frac{604,9}{200} \\
 &= 3,0245\ A
 \end{aligned}$$

b. Setting Waktu

Setting waktu yang digunakan adalah TMS (*Time Multiplier Setting*) / TD (*Time Dial*) dan diperlukan nominal arus hubung singkat satu fasa ke tanah pada jarak 0% dari panjang penyulang. Berikut adalah nominal setting waktu:

$$\begin{aligned}
 TMS = TD &= t \times \frac{\left(\frac{I_{hs\ 1\ fasa(0\%)}^a}{I_{set\ (primer)}}\right)^a - 1}{K} \\
 &= 0,3 \times \frac{\left(\frac{12053}{604,9}\right)^{0,02} - 1}{0,14} \\
 &= 0,132\ s
 \end{aligned}$$

G. Analisa Hasil Koordinasi Relay

Perbandingan data hasil perhitungan manual dengan data *exist* dapat dilihat pada Tabel XIII berikut ini.

Tabel XIII
Setting Waktu Hasil Perhitungan dan *exist*

Perbandingan Setting Waktu			
Sub – Sistem	Jenis Relay	Exist	Perhitungan
Sisi <i>Incoming</i>	Relay arus lebih	0,2 s	0,290 s
	Relay gangguan tanah	0,2 s	0,220 s

Sisi <i>Outgoing</i>	Relay arus lebih	0,1 s	0,186 s
	Relay gangguan tanah	0,1 s	0,132 s

Setelah mendapatkan hasil analisa perhitungan nominal arus dan waktu tersebut, selanjutnya membandingkan data hasil perhitungan dengan data *exist* yang diterapkan pada gardu induk 150 kV Surabaya Selatan. Terdapat perbandingan setting waktu hasil perhitungan dan existing pada penyulang Mangrove, transformator 2, gardu induk 150 kV Surabaya Selatan.

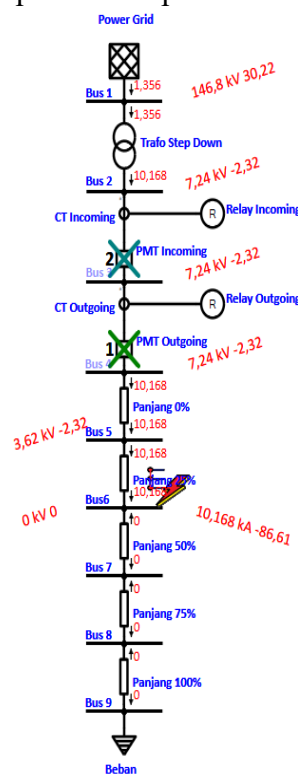
Nilai existing relay arus lebih dan relay gangguan tanah pada sisi incoming adalah sebesar 0,2 detik dan nilai exist relay arus lebih dan relay gangguan tanah pada sisi outgoing adalah sebesar 0,1 detik. Sedangkan hasil perhitungan relay arus lebih dan relay gangguan tanah pada sisi incoming berturut – turut adalah sebesar 0,290 detik dan 0,220 detik.

Nilai perhitungan relay arus lebih dan relay gangguan tanah pada sisi outgoing berturut – turut adalah sebesar 0,186 detik dan 0,132 detik. Pada Tabel XIII menunjukkan bahwa antara hasil perhitungan dan exist pada penyulang Mangrove, transformator 2, gardu induk 150 kV Surabaya Selatan memiliki perbedaan setting waktu.

Hal ini dikarenakan arus gangguan hubung singkat yang terjadi di lapangan dan pada saat kondisi simulasi tidak sama. Oleh karena itu setting existing disesuaikan dengan kemampuan peralatan dalam menahan lonjakan arus, sedangkan simulasi disesuaikan dengan nominal arus gangguan hubung singkat yang terjadi.

H. Analisa Simulasi Koordinasi Relay

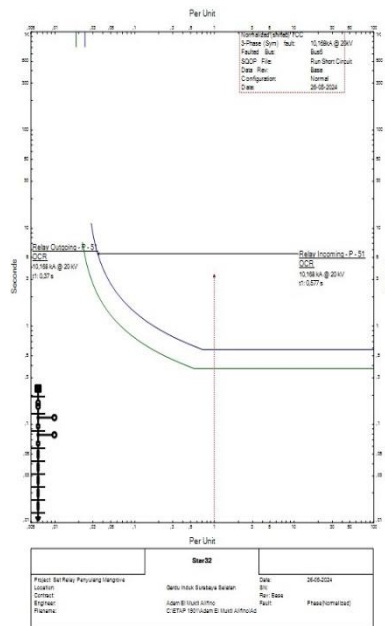
Simulasi koordinasi relay dapat terlihat pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Simulasi Koordinasi Relay

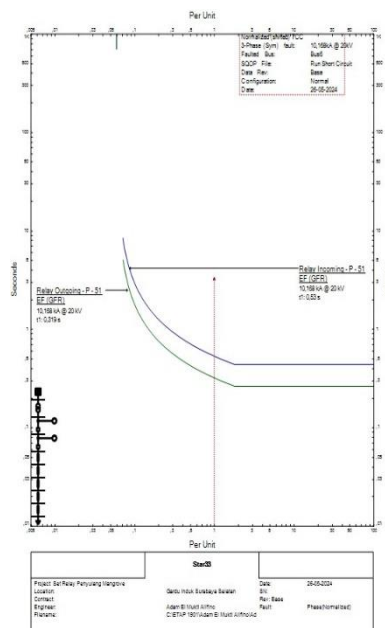
Ketika terjadi gangguan atau kondisi tidak normal dalam sistem listrik, relay arus lebih dan relay gangguan tanah berperan penting dalam mengidentifikasi masalah tersebut. Simulasi yang terlihat pada Gambar 6 menunjukkan, gangguan hubung singkat terjadi pada panjang sekitar 3 km (bus 6) dari total panjang saluran penyulang Mangrove (13,207 km).

Berdasarkan pada nominal setting arus dan nominal setting waktu, urutan kerja dari relay arus lebih dan relay gangguan tanah dimulai pada sisi outgoing penyulang Mangrove. Kurva proteksi dari relay arus lebih sisi incoming dan sisi outgoing dapat dilihat pada Gambar 7 berikut ini.



Gambar 7. Kurva Proteksi Relay Arus Lebih

Kurva proteksi dari relay gangguan tanah sisi incoming dan sisi outgoing dapat dilihat pada Gambar 8 berikut ini.



Gambar 8. Kurva Proteksi Relay Gangguan Tanah

Gambar 7 dan Gambar 8 adalah kurva proteksi yang menunjukkan koordinasi relay arus lebih dan relay gangguan tanah antara sisi incoming dan sisi outgoing dari penyulang Mangrove, transformator 2, gardu induk 150 KV Surabaya Selatan. Dalam gambar dari kurva tersebut juga dijelaskan urutan kerja apabila terjadi gangguan hubung singkat yang telah memenuhi standar IEC 60255 mengenai persyaratan dan ketentuan dalam penggunaan relay proteksi, khususnya relay arus lebih serta diperluas mencakup relay gangguan tanah [14].

Pada Gambar 7, terlihat ketika terjadi gangguan hubung singkat antar fasa, relay arus lebih pada sisi outgoing akan bekerja terlebih dahulu, dengan nominal waktu trip sebesar 0,37 detik. Setelah relay arus lebih pada sisi outgoing bekerja, maka dilanjutkan oleh relay arus lebih pada sisi incoming sebagai backup proteksi dengan nominal waktu trip sebesar 0,577 detik.

Dapat dilihat pada Gambar 8, bahwa ketika terjadi gangguan hubung singkat fasa ke tanah, relay gangguan tanah pada sisi outgoing akan bekerja terlebih dahulu, dengan nominal waktu trip sebesar 0,319 detik. Setelah relay gangguan tanah pada sisi outgoing bekerja, maka dilanjutkan oleh relay gangguan tanah pada sisi incoming sebagai backup proteksi dengan nominal waktu trip sebesar 0,53 detik.

Hasil simulasi koordinasi relay arus lebih dan relay gangguan tanah yang terlihat pada Gambar 7 dan Gambar 8 menunjukkan nominal arus kerja dan waktu kerja yang sesuai, serta tidak ada garis yang saling berpotongan antara relay arus lebih dan relay gangguan tanah pada sisi incoming dan sisi outgoing. Hal ini dapat disimpulkan bahwa kondisi sistem kelistrikan dalam keadaan baik dan koordinasi relay sudah berjalan dengan sempurna.

SIMPULAN

Setelah dilakukannya penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa:

1. Menurut hasil analisa yang telah dilakukan, relay pada sisi outgoing akan bekerja terlebih dahulu dengan nominal waktu kerja relay arus lebih sebesar 0,37 detik dan nominal waktu kerja relay gangguan tanah sebesar 0,319 detik, lalu dilanjutkan dengan relay pada sisi incoming sebagai backup proteksi yang akan bekerja dengan nominal waktu kerja relay arus lebih sebesar 0,577 detik dan nominal waktu kerja relay gangguan tanah sebesar 0,53 detik. Hal ini telah disesuaikan dengan nominal setting waktu yang memenuhi standar IEC 60255.
2. Kinerja relay bergantung pada beberapa faktor, beberapa diantaranya adalah:
 - a. Relay yang digunakan (manufaktur, jenis, dan karakteristik).
 - b. Nominal setting arus pada relay.
 - c. Nominal setting waktu pada relay.
 - d. Nominal rasio transformator (primer: sekunder).
 - e. Nominal arus hubung singkat.
 - f. Jenis perintah yang diberikan kepada relay (input).

Oleh karena itu, pemilihan relay yang digunakan sangat penting dalam menunjang keandalan distribusi tenaga Listrik, nominal setting arus dan nominal setting waktu yang diberikan juga diharapkan dapat menyesuaikan keadaan arus yang sewaktu – waktu berubah, serta memerhatikan input yang diberikan kepada relay saat membuka maupun menutup rangkaian atau sirkuit.

REFERENSI

- [1] J. T. Lim, T. Kim, and I. Bang, “Impact of Outdated CSI on the Secure Communication in Untrusted In-Band Full-Duplex Relay Networks,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 19825–19835, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3151792.
- [2] Y. Dehgummarn, P. Fuangfoo, and W. Kampeerawat, “Predictive Reliability Analysis of Power Distribution Systems Considering the Effects of Seasonal Factors on Outage Data Using Weibull Analysis Combined With Polynomial Regression,” *IEEE Access*, vol. 11, no. November, pp. 138261–138278, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3340515.
- [3] L. Wang, R. Wang, X. Li, and C. Yan, “Temperature rise simulation of medium voltage cubicle type gas insulated switch-gear based on coupling of multi-physical fields,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 45395–45404, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2908993.
- [4] I. E. Commission, “IEC 60909 - Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, Calculation of Currents,” *Int. Electrotech. Comm.*, vol. 07, p. 13, 2021.
- [5] S. N. Langazane and A. K. Saha, “Effects of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm Control Parameters on Overcurrent Relay Selectivity and Speed,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 4550–4567, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3140679.
- [6] T. Foqha, S. Alsadi, O. Omari, and S. S. Refaat, “Optimization Techniques for Directional Overcurrent Relay Coordination: A Comprehensive Review,” *IEEE Access*, vol. 12, no. January, pp. 1952–2006, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3347393.
- [7] T. E. Sati, M. A. Azzouz, and M. F. Shaaban, “Harmonic Dual-Setting Directional Overcurrent Protection for Inverter-Based Islanded Microgrids,” *IEEE Access*, vol. 11, no. March, pp. 34630–34642, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3264842.
- [8] G. Yao, Y. Zhang, T. Zhang, Q. Ma, and J. Chen, “Adaptive Grid Partitioning Considering Power Supply and Load Distribution,” *IEEE Access*, vol. 10, no. October, pp. 111066–111076, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3208886.
- [9] N. Pamudji, “Kubikel Tegangan Menengah 20 KV,” *Pedoman Pemeliharaan PLN*, vol. II, no. 1, pp. i–87, 2015.
- [10] I. E. Commission, “IEC 61363 Short Circuit Study,” *Int. Electrotech. Comm.*, 2023.
- [11] A. B. M. S. Azam, W. H. Schmidt, K. Elford, and C. Knudstrup, “Emergency Loading of a Transformer in a Coordinated Substation at Different Dynamic Loading Conditions,” *IEEE Open J. Ind. Appl.*, vol. 2, no. July, pp. 251–258, 2021, doi: 10.1109/OJIA.2021.3107743.
- [12] R. Fu and K. C. Montross, “A New Method of Coordinating ZCBs and Fuses for a Reliable Short-Circuit Protection in DC Power Networks,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 63270–63279, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3183234.
- [13] E. Jin, X. Hu, X. Wu, and S. Zhang, “Fault Current Improved Grey Slope Relational Analysis Based Unit Protection Scheme for DC Distribution Lines,” *IEEE Access*, vol. 11, no. August, pp. 88795–88806, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3301612.
- [14] I. E. Commission, “IEC 60255 Series Of Standards For Protection Functions And The Impact Of Distributed Generation On These Standards,” 2022. [Online]. Available: <https://www.iec.ch/tc95>
- [15] I. E. Commission, “Power Cables With Extruded Insulation And Their Accessories For Rated Voltages From 1 kV Up To 30 kV,” 2024.