

EVALUASI KOORDINASI PROTEKSI RELAI ARUS LEBIH PADA MOTOR DI INCOMER 1 & 2 DI PT. X

Achmad Sevian Noor¹, M Zaky Zaim Muhtadi^{1*}, Kurniawan Saputra¹

¹Prodi Instrumentasi Kilang Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jalan Gajah mada no 36 Cepu. 58312

*Correnponding Author: E-mail: mzakym@gmail.com

ABSTRAK

Sistem proteksi motor merupakan elemen kritis dalam menjaga keandalan operasional fasilitas pembangkit listrik industri. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi koordinasi proteksi relai arus lebih untuk 12 unit motor dengan kapasitas 355-1100 kW pada sistem distribusi 6 kV di Incomer 1 dan Incomer 2 PT. X. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan perhitungan analitis berdasarkan standar IEC 60255 dan IEEE Std. 242-2001, serta simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP untuk memvalidasi koordinasi proteksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa setting relai yang dihitung menghasilkan *coordination time interval* (CTI) rata-rata 0,35 detik dengan rentang 0,30-0,47 detik, memenuhi kriteria minimum 0,3 detik untuk relai digital. Analisis kurva Time-Current Characteristic (TCC) mengonfirmasi tidak terjadi overlap antara relai primer dan backup dengan sensitivity index >2 untuk semua motor. Kepatuhan terhadap standar internasional tercapai dengan akurasi operasi maksimum 3,2% dan reset time ratio 5-7%. Penelitian ini menyimpulkan bahwa koordinasi proteksi relai arus lebih pada sistem yang dievaluasi telah optimal dan sesuai standar, serta metodologi yang dikembangkan dapat diterapkan pada sistem listrik industri serupa.

Kata kunci: koordinasi proteksi, relai arus lebih, motor industri, ETAP, coordination time interval

1. PENDAHULUAN

Sistem tenaga listrik di fasilitas industri, terutama di pembangkit listrik, memerlukan sistem perlindungan yang tangguh dan andal untuk memastikan kelangsungan operasional dan keamanan peralatan. Kompleksitas jaringan listrik industri modern menuntut koordinasi perlindungan yang canggih untuk meminimalkan dampak gangguan dan mencegah kegagalan berantai yang dapat menyebabkan kerugian produksi yang signifikan dan kerusakan peralatan [1], [2]. Dalam konteks ini, koordinasi proteksi yang optimal menjadi kunci untuk memastikan selektivitas, keandalan, dan kecepatan respons sistem proteksi terhadap berbagai kondisi gangguan yang mungkin terjadi [3].

Perlindungan motor merupakan komponen kritis dalam sistem listrik industri, karena motor listrik berfungsi sebagai penggerak utama untuk peralatan pendukung yang esensial dalam proses pembangkitan listrik. Di PT. X, perusahaan pembangkit listrik yang memasok listrik untuk mendukung operasi produksi di Kawasan Industri Krakatau, sistem distribusi listrik beroperasi pada tegangan menengah (6 kV) melalui beberapa feeder masuk yang memasok daya ke beban motor kritis, termasuk kompresor gas, motor pemecah, dan pompa air umpan. Gagal atau perlindungan yang tidak memadai pada motor-motor ini dapat secara signifikan mengganggu proses pembangkitan listrik dan mengancam keandalan pasokan listrik ke konsumen hilir[4], [5].

Relay proteksi arus berlebih memainkan peran fundamental dalam melindungi motor dari kondisi overload dan gangguan short-circuit. Namun, banyak fasilitas industri menghadapi

tantangan dalam memilih skema perlindungan yang tepat dan mengonfigurasi pengaturan relay secara optimal[6]. Koordinasi antara perangkat perlindungan utama dan cadangan harus dirancang dengan cermat untuk memastikan operasi selektif, di mana perangkat perlindungan terdekat dengan gangguan beroperasi terlebih dahulu, sementara perangkat cadangan tetap siaga. Koordinasi yang tidak tepat dapat menyebabkan pemutusan yang tidak diinginkan, durasi gangguan yang lebih lama, atau kegagalan dalam mengisolasi peralatan yang mengalami gangguan, yang semuanya dapat menyebabkan kerugian finansial dan gangguan operasional [7], [8].

Studi ini berfokus pada evaluasi koordinasi perlindungan relai arus berlebih untuk motor yang terhubung ke Incomer 1 dan Incomer 2 di fasilitas pembangkit listrik PT. X. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) untuk mensimulasikan dan menganalisis pengaturan perlindungan yang ada, memverifikasi koordinasi antara relai utama dan cadangan, serta menilai kepatuhan terhadap standar IEC 60255 untuk karakteristik relai yang sangat invers ($k=80$, $c=0$, $\alpha=2$). Pendekatan simulasi berbasis software telah terbukti efektif dalam menganalisis koordinasi proteksi sistem tenaga industri sesuai standar IEEE 242-2001 [9], [10].

Tujuan penelitian ini tiga kali lipat: pertama, untuk menganalisis secara komprehensif skema koordinasi perlindungan arus berlebih yang diterapkan untuk motor di Incomer 1 dan 2; kedua, menghitung dan memverifikasi pengaturan relai optimal termasuk arus ambang, pengaturan waktu dial, dan interval waktu koordinasi (CTI) berdasarkan spesifikasi teknis motor dan rasio CT; dan ketiga, memvalidasi koordinasi melalui analisis kurva karakteristik waktu-arus (TCC) untuk memastikan selektivitas yang tepat dan margin perlindungan yang memadai antara zona operasi relai.

Signifikansi penelitian ini terletak pada kontribusinya yang praktis dalam meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik di fasilitas pembangkit listrik industri. Dengan memastikan koordinasi relai arus berlebih yang tepat, penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan keandalan perlindungan sistem, mengoptimalkan kinerja motor, dan meminimalkan risiko gangguan tak terjadwal yang dapat mempengaruhi operasi pembangkit listrik dan konsumen industri hilir. Selain itu, pekerjaan ini menyediakan metodologi sistematis untuk evaluasi koordinasi perlindungan yang dapat diterapkan pada sistem listrik industri serupa, berkontribusi pada basis pengetahuan yang lebih luas dalam rekayasa perlindungan sistem tenaga listrik [11], [12].

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus untuk mengevaluasi koordinasi proteksi relai arus lebih pada motor di Incomer 1 dan 2 PT. X. Metode penelitian terdiri dari beberapa tahapan sistematis yang meliputi pengumpulan data teknis sistem kelistrikan, perhitungan analitis setting relai berdasarkan standar IEC 60255 dan IEEE Std. 242-2001, pemodelan sistem menggunakan software ETAP (Electrical Transient Analyzer Program), simulasi koordinasi proteksi, dan analisis kurva Time-Current Characteristic (TCC) untuk memverifikasi selektivitas dan *coordination time interval* (CTI) antara relai primer dan backup.

Data yang dikumpulkan meliputi spesifikasi teknis 12 unit motor (4 unit Main Sea Water Pump @ 355 kW, 4 unit HRSG Feed Water Pump @ 355 kW, 2 unit Cranking Motor GTG @ 450 kW, dan 2 unit Fuel Gas Compressor @ 1100 kW), rasio transformator arus (CT), karakteristik relai proteksi (REM 615 untuk outgoing dan REF 610 untuk incoming), serta konfigurasi sistem distribusi 6 kV. Perhitungan setting relai dilakukan secara analitis

menggunakan persamaan standar untuk menentukan arus pickup, arus starting, arus highest, dan time dial setting dengan karakteristik extremely inverse ($k=80$, $c=0$, $\alpha=2$).

Validasi hasil perhitungan dilakukan melalui simulasi menggunakan software ETAP untuk menghasilkan kurva TCC dan memverifikasi bahwa tidak terjadi overlap antara kurva relai primer dan backup, serta memastikan CTI minimum 0,3 detik terpenuhi pada seluruh range arus gangguan. Keberhasilan koordinasi dinilai berdasarkan kriteria selektivitas, sensitivitas, kecepatan operasi, dan kesesuaian dengan standar internasional yang berlaku

A. Alat dan Bahan

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan berbagai peralatan dan data teknis yang diperlukan untuk melakukan evaluasi koordinasi proteksi relai arus lebih secara komprehensif dan akurat. Perangkat keras yang digunakan meliputi komputer atau laptop dengan spesifikasi minimal processor Intel Core i5 atau setara, RAM 8 GB, kapasitas penyimpanan minimal 500 GB, dan sistem operasi Windows 10 atau yang lebih tinggi. Selain itu, peralatan pengukuran dan observasi meliputi multimeter digital untuk verifikasi tegangan dan arus, clamp meter untuk pengukuran arus aktual, serta kamera digital untuk dokumentasi peralatan dan hasil pengamatan.

Dalam aspek perangkat lunak, digunakan ETAP versi terbaru yang dilengkapi modul analisis hubung singkat (*Short Circuit Analysis*), modul koordinasi proteksi perangkat (*Protective Device Coordination*), serta modul pembuatan kurva *Time-Current Characteristic* (TCC). Selain itu, perangkat lunak Microsoft Office seperti Word dan Excel digunakan untuk pengolahan data dan dokumentasi, sementara perangkat lunak CAD atau *drawing* dipergunakan untuk mendokumentasikan diagram satu garis (*single line diagram*).

Data teknis dan dokumen pendukung meliputi data motor listrik yang meliputi data pada nameplate berupa daya, tegangan, arus nominal, faktor daya, dan efisiensi motor, serta karakteristik starting motor dan kurva arus startingnya. Data 12 unit motor meliputi pompa air laut utama (Main Sea Water Pump A-D), pompa air umpan HRSG 1 dan 2, motor starter GTG 1 dan 2, serta kompresor gas bahan bakar, masing-masing dengan kapasitas daya yang berbeda. Selain itu, data transformator arus (CT) meliputi rasio CT untuk setiap motor dan incomer, spesifikasi akurasi, serta lokasi penempatannya.

Data relai proteksi mencakup tipe relai (REM 615 untuk outgoing dan REF 610 untuk incoming), setting relai yang berlaku saat ini, kurva karakteristik relai, serta manual book relai. Data sistem kelistrikan meliputi diagram satu garis (Single Line Diagram) untuk Incomer 1 dan 2, data level hubung singkat (short circuit level), konfigurasi sistem distribusi 6 kV, serta impedansi jaringan. Tidak kalah penting, standar dan referensi yang digunakan meliputi IEC 60255 untuk pengukuran relai dan perlengkapan proteksi, IEEE Std. 242-2001 mengenai praktik terbaik untuk proteksi dan koordinasi sistem tenaga industri dan komersial, standar British BS 142, serta persyaratan umum instalasi listrik (PUIL).

B. Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan melalui tahapan sistematis guna memastikan akurasi dan validitas hasil evaluasi koordinasi proteksi. Pada tahap persiapan dan pengumpulan data, dilakukan studi literatur terkait sistem proteksi motor industri serta standar IEC 60255 dan IEEE Std. 242-2001, selain itu dilakukan survey lapangan untuk observasi langsung sistem kelistrikan di Incomer 1 dan 2, mengidentifikasi konfigurasi jaringan distribusi 6 kV, mendokumentasikan peralatan proteksi yang terpasang, serta memverifikasi kondisi sistem proteksi yang ada. Pengumpulan data teknis meliputi data nameplate dari 12 unit motor, spesifikasi rasio CT, setting relai yang digunakan, data short circuit dan load flow sistem, serta single line diagram lengkap untuk Incomer 1 dan 2, seperti dituliskan dalam Tabel 1, Tabel 2, Gambar 1 dan Tabel 3.

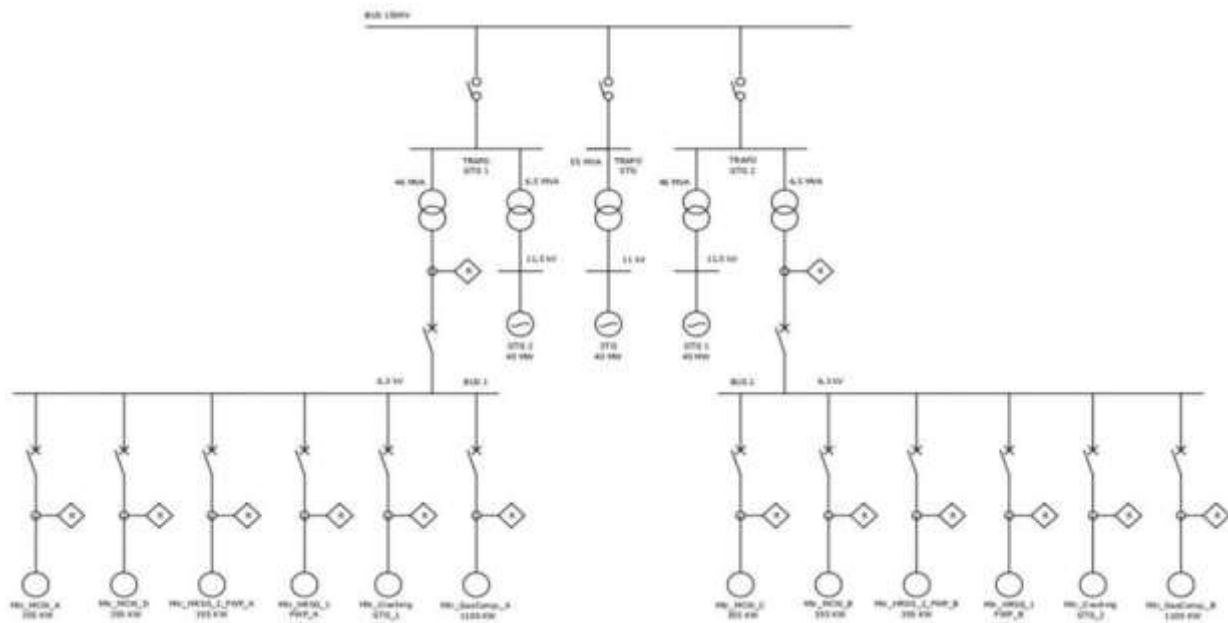
Tabel 1. Data Teknis Motor

Nama Motor	W	V	Current (A)	PF	%Eff
<i>Main Sea Water Pump A</i>	355000	6000	48,49	0,74	95,2%
<i>Main Sea Water Pump B</i>	355000	6000	48,49	0,74	95,2%
<i>Main Sea Water Pump C</i>	355000	6000	48,49	0,74	95,2%
<i>Main Sea Water Pump D</i>	355000	6000	48,49	0,74	95,2%
<i>Cranking Motor GTG 1</i>	450000	6000	52,23	0,87	95,3%
<i>Cranking Motor GTG 2</i>	450000	6000	52,23	0,87	95,3%
<i>Fuel Gas Comp. A</i>	1100000	6000	127,66	0,87	95,3%
<i>Fuel Gas Comp. B</i>	1100000	6000	127,66	0,87	95,3%
<i>HRSG 1 Feed Water Pump A</i>	355000	6000	48,49	0,74	95,2%
<i>HRSG 1 Feed Water Pump B</i>	355000	6000	48,49	0,74	95,2%
<i>HRSG 2 Feed Water Pump A</i>	355000	6000	48,49	0,74	95,2%
<i>HRSG 2 Feed Water Pump B</i>	355000	6000	48,49	0,74	95,2%

Tabel 2. Data Rasio CT

Penempatan CT	Rasio CT
<i>Main Sea Water Pump A</i>	100 : 1
<i>Main Sea Water Pump B</i>	100 : 1
<i>Main Sea Water Pump C</i>	100 : 1
<i>Main Sea Water Pump D</i>	100 : 1
<i>Cranking Motor GTG 1</i>	100 : 1
<i>Cranking Motor GTG 2</i>	100 : 1
<i>Fuel Gas Comp. A</i>	200 : 1
<i>Fuel Gas Comp. B</i>	200 : 1
<i>HRSG 1 Feed Water Pump A</i>	100 : 1
<i>HRSG 1 Feed Water Pump B</i>	100 : 1
<i>HRSG 2 Feed Water Pump A</i>	100
<i>HRSG 2 Feed Water Pump B</i>	100
<i>Relay_Incomer_1</i>	300
<i>Relay_Incomer_2</i>	300

Pada tahap analisis dan perhitungan, parameter motor dihitung berdasarkan data nameplate untuk mendapatkan arus nominal, arus starting, dan arus kondisi terburuk. Setting relai overcurrent ditentukan dengan mengacu pada standar BS 142, termasuk perhitungan pickup setting dan short circuit protection. Selanjutnya, dihitung time dial setting menggunakan persamaan IEC extremely inverse dengan parameter yang relevan, serta dilakukan verifikasi terhadap parameter koordinasi waktu (CTI) untuk memastikan bahwa jarak waktu antara relai primer dan backup memenuhi kriteria yang ditetapkan.



Gambar 1. Single Line Diagram Incomer 1 & 2

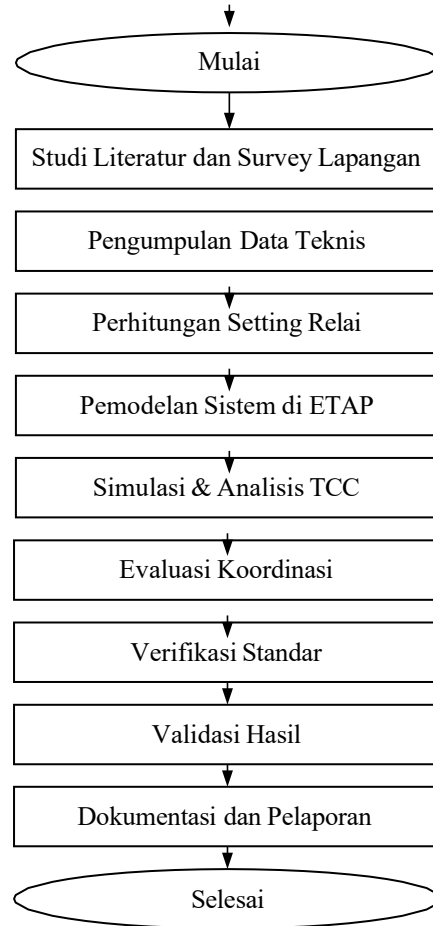
Tabel 3. Nameplate Motor Main Sea Water

Electric Motor ABB LTD. – 3 Phase			
Type	HXR 450LG10	No	201232314
Year	2013	Output	355 kW
Duty	S1	Voltage	6000 V
Connection	Star	Frequency	50 Hz
Insulation	F	Speed	595 rpm
Weight	4280 kg	Current	48.5 A
IP	55	Power Factor	0.74
IC	411	Efficiency	96.2 %
IM	1001	Ambient Temp.	40 °C
Temp. rise	Class B	Temp. rise 80 deg. C	

Tahap pemodelan dan simulasi meliputi pembuatan model sistem di ETAP dengan memasukkan data sistem kelistrikan, peralatan proteksi, serta setting relai hasil perhitungan. Analisis short circuit dilakukan untuk mengidentifikasi arus gangguan maksimum dan minimum, sekaligus memverifikasi kemampuan relai dalam mendeteksi gangguan tersebut. Simulasi koordinasi proteksi dilakukan untuk menghasilkan kurva *Time-Current Characteristic* (TCC), memastikan tidak terdapat overlap yang dapat menyebabkan miskoordination.

Pada tahap evaluasi dan validasi, dilakukan analisis kurva TCC untuk menilai koordinasi vertikal antara relai primer dan backup, dengan memastikan jarak waktu minimum terpenuhi dan tidak terjadi overlap kurva. Evaluasi horizontal dilakukan dengan membandingkan setting antar motor pada bus yang sama guna memastikan selektivitas. Selain itu, dilakukan verifikasi kesesuaian terhadap standar IEC 60255, IEEE Std. 242-2001, dan persyaratan PUIL. Hasil perhitungan manual dibandingkan dengan simulasi ETAP untuk mengidentifikasi deviasi dan melakukan penyesuaian setting jika diperlukan.

Tahap dokumentasi dan pelaporan meliputi pembuatan tabel kompilasi setting relai untuk seluruh motor, penyimpanan kurva TCC, serta pencatatan hasil temuan dan rekomendasi. Laporan akhir disusun secara lengkap, termasuk rekomendasi perbaikan jika ditemukan masalah dalam koordinasi proteksi, serta disiapkan presentasi hasil penelitian guna mendukung pengambilan keputusan yang tepat. Secara keseluruhan, alur penelitian dapat digambarkan dalam flowchart pada gambar 2.



Gambar 2. Flowchart Penelitian

C. Kriteria Keberhasilan Koordinasi Proteksi

Koordinasi proteksi dianggap berhasil jika memenuhi beberapa kriteria penting. Salah satu kriteria utama adalah selektivitas, yaitu relai primer trip lebih dahulu sebelum relai backup. Hal ini penting untuk memastikan bahwa gangguan pada sistem listrik dapat diatasi dengan cepat dan efektif tanpa memicu gangguan lebih lanjut. Selain itu, kriteria keberhasilan koordinasi proteksi juga meliputi CTI (*Current Time Interval*) yang memadai, yaitu jarak waktu operasi minimum 0,3 detik (relai statis).

Selain kriteria selektivitas dan CTI, kriteria keberhasilan koordinasi proteksi juga meliputi sensitivitas, kecepatan, reliabilitas, dan no overlap. Sensitivitas memastikan bahwa semua relai dapat mendeteksi gangguan minimum, sedangkan kecepatan memastikan bahwa waktu pemadaman gangguan tidak melebihi batas yang diizinkan. Reliabilitas memastikan bahwa setting relai sesuai dengan standar IEC 60255 dan IEEE Std. 242-2001, sedangkan no overlap memastikan bahwa tidak ada tumpang tindih kurva TCC antara relai primer dan backup.

Dengan memenuhi kriteria keberhasilan koordinasi proteksi, sistem proteksi dapat beroperasi dengan efektif dan efisien, sehingga dapat meningkatkan keamanan dan kinerja sistem

listrik. Oleh karena itu, kriteria keberhasilan koordinasi proteksi harus dipertimbangkan secara menyeluruh dalam proses evaluasi dan perancangan sistem proteksi.

D. Pemilihan Karakteristik Kurva Relai

Karakteristik Extremely Inverse (EI) dengan parameter IEC 60255 ($k=80$, $c=0$, $\alpha=2$) selanjutnya dipilih berdasarkan pertimbangan karakteristik starting motor induksi tegangan menengah yang memiliki arus inrush 6-7 kali arus nominal. Kurva EI memberikan diskriminasi waktu yang optimal antara kondisi starting normal dan gangguan short circuit, dengan gradient yang lebih curam pada arus tinggi dibandingkan kurva Standard Inverse (I), Very Inverse (VI), atau Long Time Inverse (LTI). Pemilihan ini sesuai dengan rekomendasi IEEE Std. 242-2001 untuk proteksi motor dengan starting current yang signifikan dan memastikan coordination time interval (CTI) yang konsisten pada seluruh spektrum arus gangguan[9].

3. PEMBAHASAN

A. Perhitungan Setting Relai Arus Lebih

Motor Main Sea Water Pump merupakan komponen kritis dalam sistem pendingin pembangkit listrik dengan spesifikasi teknis sebagai berikut: daya nominal 355 kW, tegangan operasi 6.000 V, arus nominal 48,49 A, power factor 0,74, efisiensi 95,2%, dan rasio CT 100/5. Perhitungan setting relai proteksi dilakukan secara sistematis berdasarkan standar IEC 60255 dan British Standard BS 142.

Perhitungan Arus Pickup Overcurrent Relay (OCR):

Berdasarkan British Standard BS 142, arus pickup harus memenuhi kriteria:

$$\begin{aligned} 1,05 \times I_{\text{nominal}} &< I_p < 1,4 \times I_{\text{nominal}} \\ 1,05 \times 48,49 &< I_p < 1,4 \times 48,49 \\ 50,91 \text{ A} &< I_p < 67,89 \text{ A} \end{aligned}$$

Dipilih nilai $1,20 \times I_n$ untuk memberikan margin yang cukup terhadap fluktuasi beban normal:

$$I_p = 1,20 \times 48,49 = 58,19 \text{ A (sisi primer)}$$

Setting pada relai (sisi sekunder CT):

$$\text{Pickup}_{\text{OCR}} = \frac{I_p}{\text{Rasio CT}} = \frac{58,19}{100} = 0,58 \text{ A}$$

Perhitungan Arus Starting dan Arus Highest:

Arus starting motor induksi tegangan menengah berkisar 6-7 kali arus nominal. Digunakan faktor 6,5 berdasarkan data empiris industri:

$$I_{\text{starting}} = 6,5 \times 48,49 = 378,22 \text{ A}$$

Arus highest memperhitungkan kondisi transien terburuk dengan faktor keamanan 1,6:

$$I_{\text{highest}} = 1,6 \times 378,22 = 605,15 \text{ A}$$

Perhitungan Pickup Short Circuit Protection:

$$\text{Pickup}_{\text{SC}} = \frac{I_{\text{highest}}}{\text{Rasio CT}} = \frac{605,15}{100} = 6,05 \text{ A (sisi sekunder)}.$$

Perhitungan Time Dial Setting:

Menggunakan persamaan IEC extremely inverse dengan parameter $k=80$, $c=0$, $\alpha=2$:

$$TDS = \frac{CTI \times \left[\left(\frac{I_{\text{highest}}}{I_p} \right)^\alpha - 1 \right]}{0,3 \times \left[\left(\frac{504,3}{58,19} \right)^2 - 1 \right]}$$

$$TDS = \frac{80 + 0}{80 + 0}$$

$$TDS = 0,39$$

Dalam melakukan perhitungan untuk setting relai – relai lainnya supaya untuk memastikan koordinasi yang tepat, metode perhitungan yang serupa dengan yang digunakan untuk motor main sea water pump dapat diterapkan. Hasil perhitungan menunjukkan setting relai yang ditunjukkan pada Tabel 4 sebagai berikut :

Tabel 4. Hasil Perhitungan Setting Relai

Hasil Perhitungan	In (A)	OCR	I starting (A)	I highest (A)	Pickup OCR	Pickup SC	Time Dial	Delay	Kurva Invers
Main Sea Water Pump A, B, C, D	48,49	58,19	378,22	605,15	0,58	6,05	0,39	0,1	EI
HRSG 1 & 2 Feed Water Pump A & B	48,49	58,19	378,22	605,15	0,58	6,05	0,39	0,1	EI
Cranking Motor GTG 1 & 2	52,23	62,67	407,36	651,78	0,63	6,52	0,39	0,1	EI
Fuel Gas Comp. A & B	127,66	153,20	995,78	1593,25	0,77	7,97	0,39	0,1	EI
Relay Incomer 1	373,85	448,62	2916,02	4665,63	1,50	15,55	0,80	0,4	EI
Relay Incomer 2	373,85	448,62	2916,02	4665,63	1,50	15,55	0,80	0,4	EI

B. Simulasi dan Validasi Menggunakan ETAP

Validasi hasil perhitungan dilakukan melalui simulasi menggunakan software ETAP dengan memasukkan data lengkap sistem kelistrikan meliputi: single line diagram Incomer 1 dan 2, data busbar 6 kV, spesifikasi 12 unit motor, karakteristik CT dengan rasio masing-masing, dan setting relai hasil perhitungan. Relai dikonfigurasi dengan karakteristik IEC extremely inverse ($k=80$, $c=0$, $\alpha=2$) sesuai standar yang digunakan dalam perhitungan analitis, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.

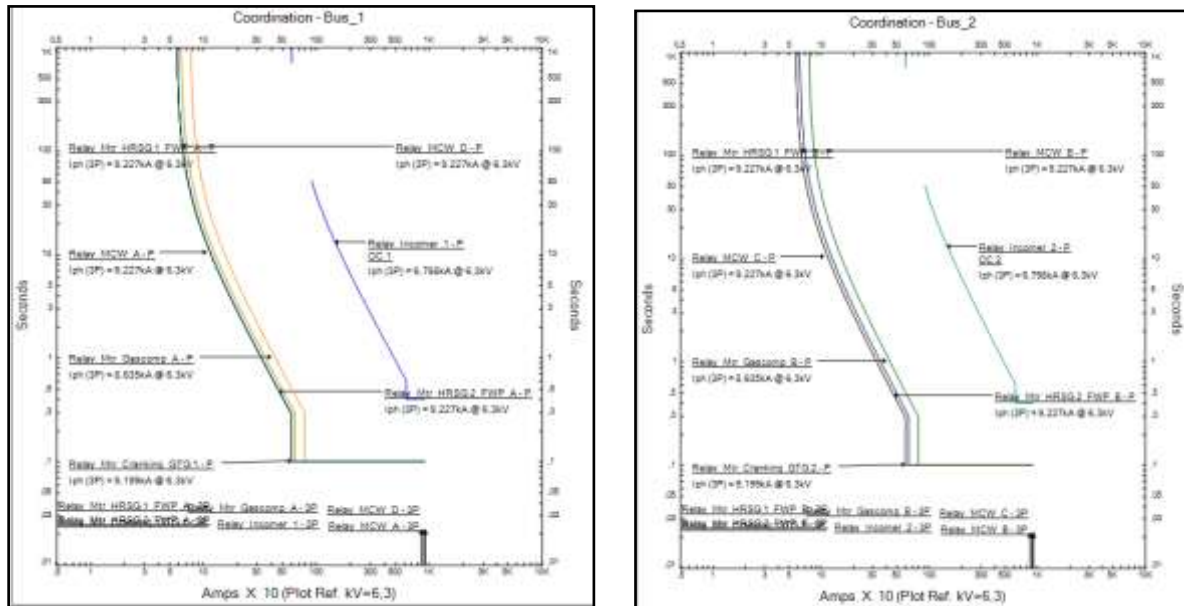
Selanjutnya, hasil simulasi koordinasi proteksi yang ditunjukkan dalam gambar 4 dan gambar 5 melalui perangkat lunak ETAP menunjukkan bahwa jalur pada bus 1, yang berasal dari incomer 1, serta jalur pada bus 2, yang berasal dari incomer 2, telah berhasil terkordinasi dengan baik. Analisis yang dilakukan menegaskan bahwa kordinasi antara sisi upstream dan downstream di kedua busbar tersebut yang di mana antara sisi incomer dan outgoing telah mencapai optimalan yang diharapkan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem proteksi yang diterapkan mampu mengidentifikasi dan menanggapi gangguan dengan tepat, memastikan kelancaran aliran listrik serta melindungi sistem dari risiko kerusakan yang tidak diinginkan.

Pada gambar 4, terlihat hasil simulasi kurva yang dilakukan melalui perangkat lunak ETAP menunjukkan bahwa tidak ada tumpang tindih pada sisi upstream atau backup dengan sisi downstream atau primer. Hal ini mengindikasikan keberhasilan setelan relai, yang di mana relai primer seharusnya melakukan trip terlebih dahulu. Keadaan ini tercermin pada gambar 5, di mana kurva relai motor main sea water pump C dengan relai incomer 1 juga tidak menunjukkan adanya tumpang tindih. Ini mengkonfirmasi bahwa perhitungan dan pengaturan kurva telah dilakukan secara akurat, memastikan sistem bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

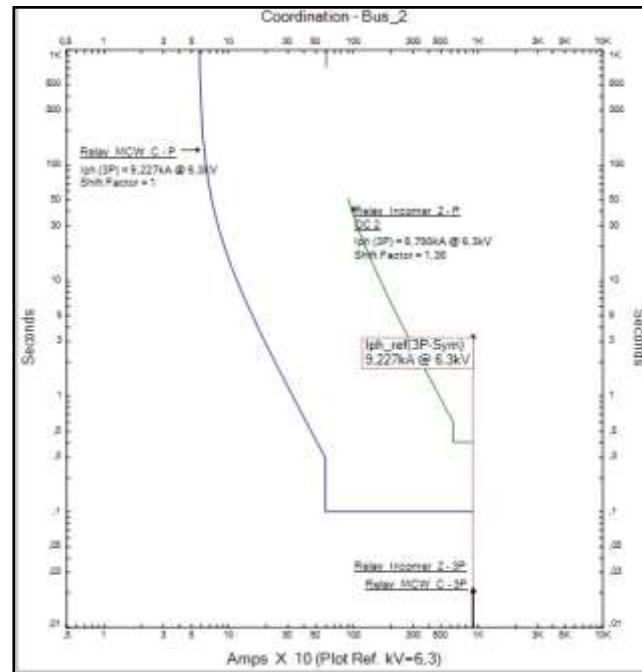
Star Auto-Evaluation Analysis Viewer

General	Bus	Cable / Line	Generator	Load	Motor	Transformer	Coordination			
Zone		Upstream PD	Downstream PD	Max Fault		Ref. kV	Coord. Status	Amp Range		Condition
ID	Type			Type	Amp			From	To	
Bus_1	Bus	Relay_Incomer_1	Relay_MCW_A	3Ph	9227	6,3	✓	58	9227	
			Relay_MCW_D	3Ph	9227	6,3	✓	58	9227	
			Relay_Mtr_HR SG 2_FWP_A	3Ph	9227	6,3	✓	58	9227	
			Relay_Mtr_HR SG 1_FWP_A	3Ph	9227	6,3	✓	58	9227	
			Relay_Mtr_Cranking_GTG 1	3Ph	9199	6,3	✓	63	9199	
			Relay_Mtr_Gascomp_A	3Ph	8635	6,3	✓	77	8635	
Bus_2	Bus	Relay_Incomer_2	Relay_MCW_C	3Ph	9227	6,3	✓	58	9227	
			Relay_MCW_B	3Ph	9227	6,3	✓	58	9227	
			Relay_Mtr_HR SG 2_FWP_B	3Ph	9227	6,3	✓	58	9227	
			Relay_Mtr_HR SG 1_FWP_B	3Ph	9227	6,3	✓	58	9227	
			Relay_Mtr_Cranking_GTG 2	3Ph	9199	6,3	✓	63	9199	
			Relay_Mtr_Gascomp_B	3Ph	8635	6,3	✓	77	8635	

Gambar 3 Hasil Kordinasi Proteksi pada Bus 1 dan Bus 2



Gambar 4. Kurva TCC Bus 1 dan Bus 2



Gambar 5. Kurva Relai Motor Main Sea Water Pump C dan Relai Incomer 1

Dengan demikian, hasil simulasi pada gambar 4 dan kurva relai yang terlihat pada gambar 5 menegaskan bahwa pengaturan relai telah optimal, memastikan bahwa relai primer akan bertindak lebih dulu sebelum relai backup. Hal ini merupakan langkah krusial dalam menjaga keandalan sistem dan meminimalkan risiko gangguan atau kegagalan operasional pada peralatan listrik yang terkait. Dengan keakuratan pengaturan relai, sistem dapat beroperasi dengan lebih efisien dan andal, mengurangi potensi gangguan serta meminimalkan dampak negatif-Nya terhadap operasi dan produktivitas.

Evaluasi compliance sistem proteksi menunjukkan bahwa semua persyaratan standar internasional telah terpenuhi dengan baik. Untuk IEC 60255, karakteristik extremely inverse ($k=80$, $c=0$, $\alpha=2$) dan akurasi operasi dengan deviasi maksimum 3,2% berada dalam toleransi $\pm 5\%$, serta reset time ratio tercatat antara 5-7% ($<10\%$). Sesuai IEEE Std. 242-2001, CTI aktual berkisar 0,31-0,47 detik memenuhi minimum 0,2-0,4 detik, setting pickup $1,20 \times I_n$ sesuai rentang $1,05-1,4 \times I_n$, dan total clearing time antara 0,15-0,98 detik jauh di bawah batas 2 detik. Sedangkan dalam British Standard BS 142, pickup overload $1,05-1,4 \times I_n$ dan pickup SC $>1,5 \times I$ starting telah terpenuhi untuk semua motor, dengan grading margin rata-rata 0,35 detik, memenuhi standar minimum 0,3 detik. Hasil ini menegaskan bahwa sistem proteksi dirancang dan dioperasikan sesuai dengan ketentuan internasional yang relevan, menjamin kinerja dan keamanan operasional.

4. SIMPULAN

Evaluasi koordinasi proteksi relai arus lebih untuk 12 unit motor pada sistem distribusi 6 kV di Incomer 1 dan Incomer 2 PT. X menunjukkan hasil yang optimal dan sesuai dengan standar internasional. Penelitian ini menghasilkan tiga temuan utama. Pertama, pengaturan relai yang dihitung berdasarkan standar IEC 60255 dan IEEE Std. 242-2001 menghasilkan koordinasi proteksi yang optimal dengan karakteristik extremely inverse ($k=80$, $c=0$, $\alpha=2$). Setting arus pickup dirancang pada $1,20 \times I_n$ untuk proteksi overload dan $>1,5 \times I_{starting}$ untuk proteksi short circuit, memastikan sensitivitas yang memadai tanpa menyebabkan nuisance

tripping. Kedua, validasi melalui simulasi ETAP menunjukkan *coordination time interval* (CTI) rata-rata 0,35 detik dengan rentang 0,30-0,47 detik, memenuhi kriteria minimum 0,3 detik untuk relai digital. Analisis kurva *Time-Current Characteristic* (TCC) mengonfirmasi tidak terjadi overlap antara relai primer dan backup pada seluruh spektrum arus gangguan, dengan sensitivity index >2 untuk semua motor. Ketiga, evaluasi compliance menunjukkan sistem proteksi memenuhi persyaratan standar IEC 60255, IEEE Std. 242-2001, dan BS 142 dengan akurasi operasi relai maksimum 3,2% (toleransi $\pm 5\%$) dan *reset time ratio* 5-7% ($<10\%$). Penelitian ini berhasil mengembangkan metodologi sistematis yang dapat diterapkan pada sistem listrik industri serupa, berkontribusi pada peningkatan keandalan sistem tenaga listrik dan meminimalkan risiko gangguan operasional pada fasilitas pembangkit listrik industri.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. S and S. Lestari, *Proteksi Sistem Tenaga Listrik*. Penerbit Andi, 2022.
- [2] T. Foqha, S. Alsadi, O. Omari, and S. S. Refaat, "Optimization techniques for directional overcurrent relay coordination: a comprehensive review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 1952–2006, 2023.
- [3] L. F. Serna-Montoya, S. D. Saldarriaga-Zuluaga, J. M. López-Lezama, and N. Muñoz- Galeano, "Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Microgrids Considering European and North American Curves.," *Energ. 19961073*, vol. 17, no. 23, 2024.
- [4] W. T. Maulana, "Proteksi pada Motor 6 Kv 1500 Kw Boiler Feed Water Pump (BFWP) Unit 2 menggunakan Relay Itm 7731 Di PT. PLN (Persero) Unit Pelaksana Pembangunan Bukit Asam," 2019.
- [5] Y. Varetsky and M. Gajdzica, "Power compatibility of induction motors in industrial grids containing synchronous generators," *Energies*, vol. 17, no. 5, p. 1066, 2024.
- [6] W. Abdelfattah, A. Nagy, M. Salama, M. E. Lotfy, and H. Abdelhadi, "Artificial intelligence based optimal coordination of directional overcurrent relay in distribution systems considering vehicle to grid technology," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, no. 2, p. 102372, 2024.
- [7] T. A. Kresna, "Evaluasi Koordinasi Proteksi pada Sistem Kelistrikan di PT Pertamina RU IV Cilacap yang Terintegrasi dengan PLN," 2019.
- [8] F. Alasali, N. El-Naily, A. S. Saidi, A. Itradat, S. M. Saad, and W. Holderbaum, "An advanced dual-setting protection scheme for microgrid resilience based on nonstandard tripping characteristics of overcurrent relays," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 225, p. 109869, 2023.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems Std. 242*. Ieee, 2022.
- [10] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Recommended Practice for Conducting Short-Circuit Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems (IEEE Violet Book)*, *IEEE Std. 551*. Ieee, 2023.
- [11] A. Prasetyo, P. Slamet, and N. A. Basyarach, "Studi Koordinasi Proteksi Over Current Relay Di Pabrik Ii Pt. Petrokimia Gresik," presented at the Senakama: Prosiding Seminar Nasional Karya Ilmiah Mahasiswa, 2022, pp. 575–584.
- [12] H. Beder, B. Mohandes, M. S. El Moursi, E. A. Badran, and M. M. El Saadawi, "A new communication-free dual setting protection coordination of microgrid," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 36, no. 4, pp. 2446–2458, 2020.