



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp: 3912-3925

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Evaluasi dan Analisis Setting Relay Proteksi Motor Induksi 6 kV pada High Pressure Boiler Feed Pump di PLTGU Gresik

Rakha Aribawa Rahman, Royb Fatkhur Rizal

Jurusan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Malang

rakha.aribawa.2309346@students.um.ac.id, fatkhurizal.fv@um.ac.id

Abstrak

Motor induksi tegangan menengah 6 kV pada sistem High Pressure Boiler Feed Pump (HP BFP) di PLTGU PT PLN Nusantara Power Gresik memainkan peran krusial dalam menjaga keberlangsungan proses pembangkitan listrik. Karena motor ini beroperasi secara terus-menerus dan menangani beban vital, sistem proteksi yang andal mutlak diperlukan guna mencegah gangguan yang dapat menyebabkan pembangkit listrik terhenti. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja dan kesesuaian pengaturan relay proteksi pada motor induksi 6 kV HP BFP berdasarkan kondisi operasi aktual di lapangan. Metodologi penelitian mencakup pengamatan langsung di lokasi, pengumpulan data teknis nameplate motor, pengujian circuit breaker, serta pengujian parameter relay proteksi yang meliputi Overcurrent Relay (OCR), Ground Fault Relay (GFR), Current Unbalance Protection, Acceleration Time Protection, dan Thermal Overload Protection. Arus nominal motor dihitung sebesar 283,04 A dan digunakan sebagai acuan dalam evaluasi setting relay. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebagian besar sistem proteksi bekerja dalam kondisi baik, yaitu pengujian circuit breaker, GFR, OCR pada parameter arus, dan Thermal Overload Protection seluruhnya memenuhi batas acceptance yang ditentukan. Namun, ditemukan ketidaksesuaian pada parameter waktu operasi relay OCR (error 24 ms, melebihi batas 20 ms), Current Unbalance Protection (error 0,033 s, melebihi batas 0,02 s), dan Acceleration Time Protection (error 0,034 s, melebihi batas 0,02 s). Ketidakesuaian ini berpotensi memengaruhi koordinasi dan selektivitas sistem proteksi. Oleh karena itu, disarankan dilakukan evaluasi, kalibrasi, dan penyesuaian setting relay secara berkala agar sistem proteksi motor induksi 6 kV tetap bekerja secara optimal, responsif, dan andal sesuai standar IEC 60255 dan IEEE C37.96.

Kata kunci: Motor Induksi 6 kV, Relay Proteksi, Relay Arus Lebih (OCR), Relay Gangguan Tanah (GFR), High Pressure Boiler Feed Pump (HP BFP)

1. Latar Belakang

Motor induksi tegangan menengah merupakan salah satu peralatan listrik yang banyak digunakan di dunia industri, khususnya pada sistem pembangkit listrik. Penggunaan motor induksi dipilih karena memiliki konstruksi yang sederhana, perawatan yang relatif mudah, serta mampu bekerja secara kontinu dengan tingkat keandalan yang tinggi (Ghozlizar et al., 2021), (Shaikh et al., 2022). Pada sistem pembangkit listrik, motor induksi 6 kV digunakan untuk mengoperasikan berbagai peralatan bantu pembangkit yang memiliki peran penting terhadap keberlangsungan proses produksi energi listrik, salah satunya yaitu High Pressure Boiler Feed Pump (HP BFP).

High Pressure Boiler Feed Pump (HP BFP) berfungsi untuk mensuplai air bertekanan tinggi menuju boiler sebagai bagian penting dalam proses pembangkitan listrik. Karena bekerja secara terus-menerus dan berada pada kondisi beban yang cukup besar, motor penggerak HP BFP memiliki risiko mengalami gangguan kelistrikan seperti arus lebih, gangguan hubung tanah, beban lebih, ketidakseimbangan arus antar fasa, maupun kegagalan saat proses starting motor (Adha & Kurniawan, 2026), (Chakraborty et al., 2026). Apabila gangguan tersebut tidak segera ditangani, maka dapat menyebabkan kerusakan pada motor serta mengganggu kontinuitas operasi pembangkit listrik.

Untuk mencegah terjadinya kerusakan peralatan dan menjaga keandalan sistem, motor induksi 6 kV dilengkapi dengan sistem proteksi menggunakan relay proteksi digital yang terintegrasi dengan circuit breaker tegangan menengah. Sistem proteksi ini berfungsi mendeteksi kondisi abnormal pada motor kemudian memberikan

perintah trip agar gangguan dapat segera diisolasi (Arifuddin, 2023) , (Otong & Albantani, 2024) . Beberapa jenis proteksi yang digunakan pada motor induksi antara lain Overcurrent Relay (OCR), Ground Fault Relay (GFR), thermal overload protection, unbalance protection, dan acceleration time protection.

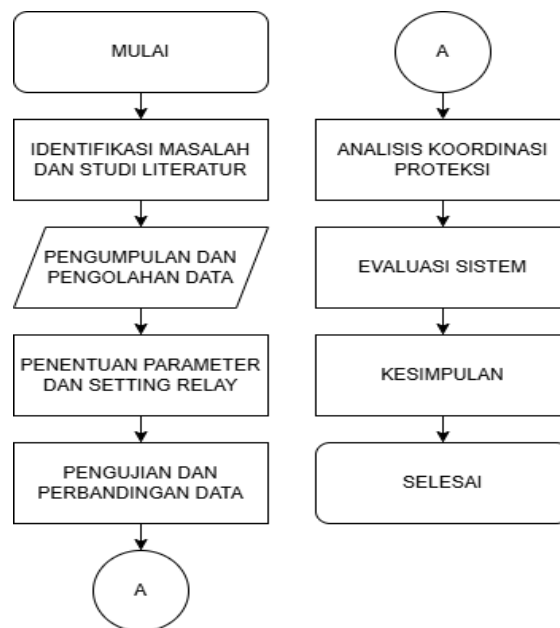
Keandalan sistem proteksi sangat dipengaruhi oleh ketepatan setting relay yang digunakan. Setting relay yang terlalu sensitif dapat menyebabkan relay bekerja saat kondisi normal, seperti ketika motor mengalami starting, sehingga menimbulkan nuisance trip (Ridho et al., 2024) . Sebaliknya, setting yang terlalu besar dapat menyebabkan relay terlambat mendeteksi gangguan dan meningkatkan risiko kerusakan motor (Chakraborty et al., 2026) . Oleh karena itu, evaluasi terhadap setting relay proteksi perlu dilakukan secara berkala agar sistem proteksi tetap bekerja secara optimal sesuai karakteristik operasi motor dan kondisi aktual di lapangan (Setyabudi & Irawan, 2026) .

Selain itu, koordinasi antar perangkat proteksi juga menjadi faktor penting dalam menjaga keandalan sistem proteksi. Koordinasi yang baik akan membantu sistem proteksi bekerja secara selektif sehingga gangguan dapat diisolasi tanpa ccmempengaruhi peralatan lain pada sistem tenaga listrik (Ibrahmusa et al., 2023) .Oleh karena itu, pengujian dan evaluasi relay proteksi perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan sistem proteksi tetap bekerja sesuai karakteristik operasi motor induksi tegangan menengah (Masdi et al., 2025) .

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi dan menganalisis setting relay proteksi motor induksi 6 kV pada sistem High Pressure Boiler Feed Pump di PLTGU. Analisis dilakukan berdasarkan data teknis motor, hasil pengujian relay proteksi, serta pengujian circuit breaker. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan evaluasi dalam meningkatkan keandalan sistem proteksi motor induksi tegangan menengah pada sistem pembangkitan listrik.

2. Metode Penelitian

a. Langkah Penelitian



Gambar 1. Diagram Alir Langkah Penelitian

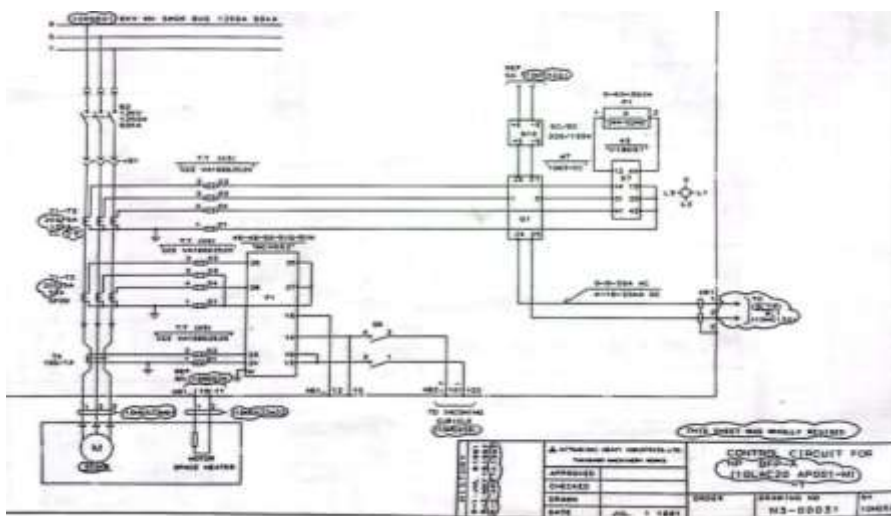
Diagram tersebut menunjukkan tahapan penelitian yang dilakukan secara berurutan. Proses dimulai dari studi literatur sebagai dasar teori, kemudian dilanjutkan dengan pengumpulan data di lapangan. Setelah data diperoleh, dilakukan perhitungan dan analisis untuk mengevaluasi sistem proteksi. Hasil analisis tersebut digunakan sebagai dasar dalam menarik kesimpulan. Dengan alur ini, penelitian dapat dilakukan secara lebih terstruktur dan sistematis.

b. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Gresik sebagai lokasi utama pengambilan data. Pemilihan tempat penelitian didasarkan pada pelaksanaan kegiatan magang penulis di perusahaan tersebut, sehingga proses pengumpulan data dan pengamatan sistem dapat dilakukan secara langsung. Selain itu, unit pembangkit ini memiliki sistem kelistrikan tegangan menengah dengan tingkat kompleksitas yang cukup tinggi, termasuk penggunaan motor induksi 6 kV pada sistem High Pressure Boiler Feed Pump (HP BFP). Pada sistem tersebut juga telah diterapkan relay proteksi digital yang mendukung proses analisis dalam penelitian ini.

c. Pengumpulan Data

Untuk mempermudah pemahaman mengenai sistem yang diteliti, ditampilkan single line diagram sistem proteksi motor HP BFP pada Gambar 2. Diagram ini menunjukkan susunan peralatan listrik yang terhubung dengan motor induksi tiga fasa, mulai dari sumber daya, perangkat pengendali, hingga relay proteksi. Melalui diagram tersebut, alur penyaluran daya listrik dan posisi masing-masing perangkat proteksi dapat terlihat dengan lebih jelas sehingga proses analisis sistem menjadi lebih mudah dipahami.



Gambar 2. Single Line Diagram Sistem Proteksi Motor HP BFP

Gambar 2 memperlihatkan single line diagram sistem proteksi motor HP BFP yang digunakan sebagai penggerak High Pressure Boiler Feed Pump. Diagram ini menggambarkan hubungan antara sistem tenaga, motor induksi tiga fasa 6 kV, serta perangkat proteksi yang digunakan untuk menjaga keamanan operasi motor. Relay proteksi dipasang pada beberapa titik penting untuk mendeteksi gangguan seperti arus lebih, hubung singkat, kehilangan fasa, dan beban lebih. Selain itu, diagram ini juga membantu menunjukkan bagaimana koordinasi kerja antarperalatan proteksi dalam menjaga keandalan sistem. Dengan adanya ilustrasi tersebut, pembaca dapat lebih mudah memahami proses analisis dan evaluasi setting relay yang dilakukan pada penelitian ini.

d. Metode Analisis

Metode analisis pada penelitian ini dilakukan dengan mengevaluasi kesesuaian setting relay proteksi terhadap karakteristik kerja motor induksi 6 kV yang digunakan pada sistem High Pressure Boiler Feed Pump (HP BFP). Proses analisis mengacu pada data nameplate motor, data setting relay yang digunakan di lapangan, serta hasil pengujian relay dan circuit breaker yang telah dilakukan selama pengambilan data.

Perhitungan arus nominal motor dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$I_n = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos\phi} \quad (1)$$

Keterangan:

- I_n = arus nominal motor (A)
- P = daya motor (W)
- V = tegangan kerja motor (V)
- $\cos\phi$ = faktor daya motor

Setelah arus nominal diperoleh, langkah berikutnya adalah menentukan nilai setting pickup pada Overcurrent Relay (OCR) dengan menggunakan persamaan:

$$I_{set} = k \times I_n \quad (2)$$

Keterangan:

- I_{set} = arus setting relay
- k = konstanta pengali setting relay
- I_n = arus nominal motor

Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan nilai setting relay existing untuk mengetahui tingkat kesesuaian sistem proteksi terhadap kondisi operasi aktual motor induksi 6 kV. Selain itu, dilakukan juga analisis terhadap hasil pengujian relay dengan membandingkan nilai setting dan hasil pengukuran aktual untuk memperoleh nilai error pengujian relay. Perhitungan persentase error dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Error}(\%) = \frac{|\text{Setting} - \text{Measurement}|}{\text{Setting}} \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

- Error (%) = persentase error hasil pengujian relay
- Setting = nilai setting relay
- Measurement = nilai hasil pengukuran aktual

Sedangkan untuk parameter waktu operasi relay, perhitungan error dilakukan menggunakan persamaan:

$$\text{Error} = |\text{Setting} - \text{Measurement}| \quad (4)$$

Keterangan:

- Error = selisih waktu pengujian relay
- Setting = waktu setting relay
- Measurement = waktu hasil pengujian relay

Nilai error yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan batas acceptance pengujian relay untuk menentukan kondisi dan performa sistem proteksi. Jika nilai error masih berada di bawah batas acceptance, maka relay dinyatakan masih bekerja dengan baik. Sebaliknya, apabila nilai error melebihi batas yang ditentukan, maka diperlukan evaluasi dan penyesuaian setting agar sistem proteksi dapat bekerja lebih optimal dan andal saat terjadi gangguan pada motor induksi 6 kV.

3. Hasil dan Diskusi

a. Data Motor Induksi 6 kV

Motor induksi 6 kV pada sistem High Pressure Boiler Feed Pump (HP BFP) memiliki peranan penting dalam proses pembangkitan listrik, yaitu sebagai penggerak pompa air bertekanan tinggi yang menyuplai air menuju boiler (Indrawan et al., 2023). Karena motor beroperasi secara terus-menerus dalam mendukung proses produksi

listrik, maka diperlukan sistem proteksi yang mampu menjaga keandalan operasi serta melindungi motor dari potensi gangguan kelistrikan yang dapat menyebabkan kerusakan peralatan (Schegner, 2021) .

Untuk menjaga keamanan operasi, motor dilengkapi dengan sistem proteksi berbasis relay digital yang terhubung dengan circuit breaker tegangan menengah (Dimova, 2021) . Beberapa fungsi proteksi yang diterapkan pada sistem ini antara lain Overcurrent Relay (OCR), Ground Fault Relay (GFR), thermal overload protection, unbalance protection, serta acceleration time protection. Masing-masing proteksi memiliki fungsi untuk mendeteksi gangguan tertentu agar motor dapat segera diamankan sebelum terjadi kerusakan yang lebih besar.

Tabel 1. Data Spesifikasi Motor Induksi 6 kV

Parameter	Nilai
Tegangan Motor	6 kV
Daya Motor	2500 kW
Frekuensi	50 Hz
Faktor Daya	0,85
Jenis Motor	Motor Induksi 3 Fasa
Sistem Proteksi	Relay Electrical

Berdasarkan data nameplate, motor induksi yang digunakan bekerja pada sistem tegangan menengah dengan kapasitas daya yang besar. Kondisi tersebut menyebabkan motor memerlukan sistem proteksi yang andal agar tetap aman selama beroperasi dan terhindar dari gangguan yang dapat merusak peralatan maupun mengganggu proses pembangkitan listrik.

Arus nominal motor merupakan salah satu parameter penting dalam sistem proteksi motor induksi. Nilai arus nominal digunakan sebagai dasar dalam menentukan setting relay proteksi seperti Overcurrent Relay (OCR), thermal overload protection, dan acceleration time protection agar sistem proteksi dapat bekerja sesuai karakteristik motor. Perhitungan arus nominal motor diperoleh sebagai berikut:

$$I_n = \frac{2500 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6000 \times 0.85} \quad (5)$$

Hasil perhitungan diperoleh:

$$I_n = 283.04 \text{ A} \quad (6)$$

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, arus nominal motor sebesar 283,04 A digunakan sebagai dasar dalam menentukan dan mengevaluasi setting relay proteksi motor induksi 6 kV. Dengan penentuan setting yang sesuai, relay proteksi diharapkan mampu bekerja secara optimal saat terjadi gangguan pada sistem.

b. Hasil Pengujian Circuit Breaker

Pengujian circuit breaker dilakukan untuk mengevaluasi kondisi mekanis serta kualitas kontak pada pemutus tenaga yang digunakan dalam sistem proteksi motor induksi 6 kV (Asefi et al., 2022) . Pemeriksaan ini bertujuan untuk memastikan circuit breaker masih mampu bekerja secara optimal saat terjadi gangguan pada sistem kelistrikan (Hartanto et al., 2023) . Jenis pengujian yang dilakukan meliputi contact resistance test untuk mengetahui nilai tahanan kontak pada circuit breaker, serta timing test untuk mengukur kecepatan kerja pemutus tenaga saat proses membuka dan menutup kontak. Hasil pengujian tersebut digunakan sebagai dasar dalam menilai keandalan circuit breaker pada sistem proteksi motor HP BFP.

1) Contact Resistance Test

Pengujian contact resistance dilakukan untuk mengevaluasi kualitas kontak pada circuit breaker dan memastikan nilai tahanan kontak pada setiap fasa masih berada dalam kondisi baik. Nilai tahanan kontak yang terlalu besar dapat menyebabkan kenaikan temperatur pada peralatan dan berpotensi mengganggu kinerja sistem proteksi. Hasil pengujian contact resistance pada circuit breaker ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Contact Resistance Test

Fasa	Nilai Pengujian	Standar	Status
R	31 $\mu\Omega$	< 50 $\mu\Omega$	Baik
S	28 $\mu\Omega$	< 50 $\mu\Omega$	Baik
T	36 $\mu\Omega$	< 50 $\mu\Omega$	Baik

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, nilai tahanan kontak pada setiap fasa masih berada dalam batas standar yang diperbolehkan. Nilai tahanan yang rendah menunjukkan bahwa kondisi kontak pada circuit breaker masih baik sehingga arus listrik dapat mengalir dengan baik dan rugi daya yang terjadi relatif kecil.

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa selisih nilai tahanan antar fasa tidak terlalu jauh. Hal ini menandakan bahwa kondisi kontak pada pemutus tenaga masih merata dan belum mengalami penurunan kualitas yang signifikan. Kondisi tersebut sangat penting untuk menjaga keandalan serta kestabilan sistem proteksi motor induksi 6 kV yang bekerja secara terus-menerus pada sistem HP BFP.

2) Timing Test Circuit Breaker

Pengujian timing test dilakukan untuk mengukur waktu kerja circuit breaker pada saat proses membuka dan menutup kontak. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa circuit breaker dapat bekerja dengan cepat dan tetap memiliki keserempakan antar fasa selama proses switching berlangsung. Hasil pengujian timing test pada circuit breaker ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Timing Test Circuit Breaker

Parameter	R (ms)	S (ms)	T (ms)	Standar	Status
Closing Time	45	45	45.5	<100	Baik
Opening Time	66.2	65.7	65.2	<100	Baik

Nilai closing time yang masih relatif kecil menunjukkan bahwa circuit breaker masih mampu melakukan proses penyambungan sistem dengan cepat dan stabil. Selain itu, selisih waktu operasi antar fasa juga tidak terlalu jauh, sehingga menandakan bahwa sinkronisasi kerja antar fasa masih berada dalam kondisi yang baik.

Pada pengujian opening time, circuit breaker juga menunjukkan kemampuan pemutusan sistem yang cukup cepat. Kecepatan opening ini sangat penting dalam sistem proteksi karena berkaitan langsung dengan proses isolasi gangguan agar arus gangguan tidak berlangsung terlalu lama dan menyebabkan kerusakan pada peralatan.

Apabila dibandingkan dengan karakteristik umum pengujian circuit breaker tegangan menengah, hasil yang diperoleh masih menunjukkan performa operasi yang normal karena seluruh waktu operasi masih berada di

bawah batas maksimum standar pengujian. Dengan kondisi tersebut, dapat disimpulkan bahwa mekanisme kerja dan sistem operasi circuit breaker masih layak digunakan sebagai pemutus tenaga pada motor induksi 6 kV.

c. Hasil Pengujian Ground Fault Relay (GFR)

Ground Fault Relay (GFR) merupakan salah satu perangkat proteksi yang digunakan untuk mendeteksi terjadinya gangguan hubung tanah pada motor induksi 6 kV. Gangguan jenis ini dapat menyebabkan kerusakan pada sistem isolasi motor dan berpotensi mengganggu kontinuitas operasi apabila tidak segera ditangani (Hu et al., 2023). Oleh karena itu, diperlukan sistem proteksi yang mampu merespons gangguan dengan cepat dan tepat agar kerusakan peralatan dapat diminimalkan.

Pengujian Ground Fault Relay dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara nilai setting relay dengan hasil pengukuran aktual saat pengujian di lapangan. Parameter yang diuji meliputi arus kerja relay dan waktu operasi relay ketika mendeteksi gangguan ground fault. Hasil pengujian Ground Fault Relay ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Ground Fault Relay (GFR)

Parameter	Setting	Hasil Pengujian	Standar	Status
Current (A)	0,1	0,102	< 5%	Baik
Time (s)	0,04	0,039	< 0,02 s	Baik

Berdasarkan perhitungan persentase error arus relay diperoleh :

$$\text{Error} = \frac{|0.1 - 0.102|}{0.1} \times 100\% \quad (7)$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai error yang diperoleh :

$$\text{Error} = 2\% \quad (8)$$

Selain pengujian arus, dilakukan juga evaluasi terhadap waktu operasi relay. Perhitungan error waktu diperoleh sebagai berikut:

$$\text{Error} = |0.04 - 0.039| \quad (9)$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai error waktu sebesar :

$$\text{Error} = 0.001 \text{ s} \quad (10)$$

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 4, nilai error arus sebesar 2% masih berada di bawah batas acceptance sebesar 5%. Sementara itu, error waktu operasi relay sebesar 0,001 s juga masih berada di bawah batas acceptance sebesar 0,02 s. Hasil tersebut menunjukkan bahwa relay masih memiliki tingkat sensitivitas dan akurasi yang baik dalam mendeteksi gangguan hubung tanah.

Apabila dibandingkan dengan karakteristik relay proteksi menurut standar International Electrotechnical Commission IEC 60255, relay proteksi harus mampu bekerja secara cepat, sensitif, dan selektif dalam mendeteksi gangguan pada sistem tenaga listrik. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, fungsi Ground Fault Relay masih bekerja sesuai karakteristik proteksi yang diharapkan, sehingga sistem proteksi ground fault pada motor induksi 6 kV masih berada dalam kondisi baik dan layak digunakan (Bonetti, 2021).

d. Hasil Pengujian Overcurrent Relay (OCR)

Overcurrent Relay (OCR) merupakan salah satu sistem proteksi yang digunakan untuk melindungi motor induksi 6 kV dari gangguan arus lebih maupun hubung singkat. Pengujian dilakukan untuk mengetahui kesesuaian

antara nilai setting relay dengan hasil pengukuran aktual saat proses pengujian berlangsung. Hasil pengujian Overcurrent Relay ditunjukkan pada tabel 5.

Tabel 5 Hasil Pengujian Overcurrent Relay (OCR)

Parameter	Setting	Hasil Pengujian	Standar	Status
Current (A)	21,875	21,9	< 5%	Baik
Time (ms)	40	16	< 20 ms	Tidak Baik

Perhitungan error pada parameter arus dilakukan berdasarkan selisih antara nilai setting relay dan hasil pengukuran aktual. Dari hasil pengujian diperoleh nilai setting arus sebesar 21,875 A dan hasil pengukuran sebesar 21,9 A sehingga perhitungan error dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Error}(\%) = \frac{|21.875 - 21.9|}{21.875} \times 100\% \quad (11)$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai error sebesar:

$$\text{Error} = 0.11\% \quad (12)$$

Nilai error tersebut masih berada di bawah batas acceptance sebesar 5%, sehingga parameter arus relay masih dinyatakan dalam kondisi baik dan sesuai dengan nilai setting yang ditentukan.

Sementara itu, pada parameter waktu operasi relay diperoleh nilai setting sebesar 40 ms dan hasil pengujian aktual sebesar 16 ms. Selisih waktu operasi relay dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Error} = |40 - 16| \quad (13)$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai error waktu sebesar:

$$\text{Error} = 24 \text{ ms} \quad (14)$$

Nilai tersebut melebihi batas acceptance sebesar 20 ms sehingga hasil pengujian dinyatakan Tidak Baik.

Berdasarkan hasil pengujian, relay masih menunjukkan tingkat akurasi yang baik pada parameter arus. Namun, respon waktu operasi relay belum sesuai dengan karakteristik setting yang diharapkan. Waktu operasi relay yang terlalu cepat dapat mempengaruhi koordinasi sistem proteksi, terutama ketika motor mengalami proses starting maupun gangguan sesaat.

Selain itu, ketidaksesuaian waktu operasi relay juga dapat mempengaruhi koordinasi kerja antara relay proteksi dan circuit breaker sebagai sistem pemutus tenaga. Jika relay bekerja terlalu cepat, maka relay berpotensi menyebabkan trip yang tidak diperlukan sehingga kontinuitas operasi sistem dapat terganggu.

Apabila dibandingkan dengan panduan proteksi motor induksi menurut Institute of Electrical and Electronics Engineers IEEE C37.96, relay OCR seharusnya mampu bekerja secara selektif dengan karakteristik waktu operasi yang sesuai terhadap kondisi starting motor maupun gangguan arus lebih. Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, fungsi OCR masih memerlukan evaluasi dan penyesuaian setting, terutama pada parameter waktu operasi relay agar sistem proteksi dapat bekerja lebih optimal dan andal (IEEE Power Engineering Society, 1987).

e. Hasil Pengujian Current Unbalance Protection

Current Unbalance Protection merupakan sistem proteksi yang digunakan untuk mendeteksi adanya ketidakseimbangan arus antar fasa pada motor induksi 6 kV. Ketidakseimbangan arus ini dapat menyebabkan

kenaikan temperatur pada rotor maupun stator motor. Apabila kondisi tersebut dibiarkan dalam waktu lama, maka dapat mempercepat kerusakan isolasi lilitan motor dan menurunkan keandalan operasi motor induksi (Laadjal et al., 2021).

Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah nilai setting relay sudah sesuai dengan hasil pengukuran aktual saat pengujian berlangsung. Parameter yang diuji meliputi besarnya arus dan waktu operasi relay ketika terjadi kondisi unbalance. Hasil pengujian Current Unbalance Protection dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pengujian Current Unbalance Protection

Parameter	Setting	Hasil Pengujian	Standar	Status
Current (A)	0,55	0,56	< 5%	Baik
Time (s)	2	2,033	< 0,02 s	Tidak Baik

Perhitungan error pada parameter arus dilakukan dengan membandingkan nilai setting relay terhadap hasil pengukuran aktual. Berdasarkan hasil pengujian, diketahui setting arus relay sebesar 0,55 A sedangkan hasil pengukuran menunjukkan nilai sebesar 0,56 A. Perhitungan error dilakukan sebagai berikut:

$$\text{Error} = \frac{|0.55-0.56|}{0.55} \times 100\% \quad (15)$$

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai error sebesar:

$$\text{Error} = 1.8\% \quad (16)$$

Nilai error tersebut masih berada di bawah batas acceptance sebesar 5%, sehingga parameter arus relay masih dinyatakan baik dan sesuai dengan setting yang telah ditentukan.

Sementara itu, pada parameter waktu operasi relay diperoleh nilai setting sebesar 2 s dan hasil pengukuran aktual sebesar 2,033 s. Selisih waktu operasi relay dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Error} = |2 - 2.033| \quad (17)$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai error waktu sebesar:

$$\text{Error} = 0.033 \text{ s} \quad (18)$$

Nilai tersebut melebihi batas acceptance yang ditentukan, yaitu 0,02 s, sehingga hasil pengujian pada parameter waktu dinyatakan Tidak Baik.

Berdasarkan hasil pengujian, relay masih memiliki tingkat akurasi yang baik pada parameter arus. Namun, waktu operasi relay belum bekerja sesuai dengan karakteristik setting yang diharapkan. Ketidaksesuaian waktu operasi ini dapat mempengaruhi respon sistem proteksi dalam mendeteksi ketidakseimbangan arus pada motor induksi.

Kondisi ketidakseimbangan arus yang terjadi secara terus-menerus dapat menyebabkan peningkatan temperatur pada rotor dan stator motor. Selain mempercepat penurunan kualitas isolasi lilitan, kondisi tersebut juga dapat menurunkan efisiensi kerja motor dan mengganggu kestabilan sistem kelistrikan secara keseluruhan (Cogburn & Bhattarai, 2023).

Jika mengacu pada karakteristik proteksi motor induksi berdasarkan standar IEEE C37.96, relay current unbalance protection seharusnya mampu mendeteksi gangguan ketidakseimbangan arus secara cepat dan akurat agar motor tetap terlindungi dari kondisi overheating. Oleh karena itu, berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, diperlukan evaluasi dan penyesuaian setting terutama pada parameter waktu operasi relay agar sistem proteksi dapat bekerja lebih optimal, cepat, dan andal (IEEE Power Engineering Society, 1987).

f. Hasil Pengujian Acceleration Time Protection

Acceleration Time Protection merupakan sistem proteksi yang digunakan untuk mendeteksi kegagalan percepatan motor induksi pada saat proses starting. Proteksi ini bekerja dengan memonitor lamanya waktu yang dibutuhkan motor untuk mencapai kondisi operasi normal. Apabila waktu starting melebihi setting yang telah ditentukan, relay akan memberikan perintah trip guna melindungi motor dari kondisi locked rotor maupun arus starting yang berlangsung terlalu lama (Rahmani et al., 2019).

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kesesuaian antara nilai setting relay dengan hasil pengukuran aktual saat pengujian berlangsung. Parameter yang diuji meliputi besarnya arus dan waktu operasi relay. Hasil pengujian Acceleration Time Protection dapat dilihat pada tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Acceleration Time Protection

Parameter	Setting	Hasil Pengujian	Standar	Status
Current (A)	13,5	13,3	< 5%	Baik
Time (s)	2,5	2,466	< 0,02 s	Tidak baik

Perhitungan error pada parameter arus dilakukan dengan membandingkan nilai setting relay terhadap hasil pengukuran aktual. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh setting arus sebesar 13,5 A dan hasil pengukuran sebesar 13,3 A. Perhitungan error dilakukan sebagai berikut:

$$\text{Error} = \frac{|13.5-13.3|}{13.5} \times 100\% \quad (19)$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai error sebesar:

$$\text{Error} = 1.1\% \quad (20)$$

Nilai error tersebut masih berada di bawah batas acceptance sebesar 5%, sehingga parameter arus relay masih dinyatakan dalam kondisi baik dan sesuai dengan setting yang telah ditentukan.

Sementara itu, pada parameter waktu operasi relay diperoleh setting sebesar 2,5 s dan hasil pengujian aktual sebesar 2,466 s. Selisih waktu operasi relay dihitung dengan persamaan berikut:

$$\text{Error} = |2.5 - 2.466| \quad (21)$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai error waktu sebesar:

$$\text{Error} = 0.034 \text{ s} \quad (22)$$

Nilai tersebut melebihi batas acceptance sebesar 0,02 s sehingga hasil pengujian pada parameter waktu dinyatakan Tidak Baik.

Berdasarkan hasil pengujian, relay masih menunjukkan tingkat akurasi yang baik pada parameter arus. Namun, waktu operasi relay belum bekerja sesuai dengan karakteristik setting yang diharapkan. Ketidaksesuaian waktu operasi tersebut dapat mempengaruhi kemampuan sistem proteksi dalam mendeteksi kegagalan percepatan motor secara cepat dan tepat (Jácome-Barrionuevo et al., 2024).

Waktu starting motor yang terlalu lama dapat menyebabkan arus starting mengalir secara terus-menerus sehingga temperatur rotor dan stator meningkat secara signifikan. Kondisi tersebut dapat mempercepat penurunan kualitas isolasi motor serta meningkatkan risiko kerusakan pada motor induksi apabila tidak segera diamankan oleh sistem proteksi (Zanusso & Peretti, 2023).

Jika dibandingkan dengan karakteristik proteksi motor induksi berdasarkan standar IEEE C37.96, relay acceleration time protection seharusnya mampu mendeteksi kondisi locked rotor atau kegagalan percepatan motor secara cepat dan akurat untuk mencegah terjadinya overheating akibat arus starting yang berkepanjangan. Oleh karena itu, berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, relay masih memerlukan evaluasi dan penyesuaian setting terutama pada parameter waktu operasi agar sistem proteksi dapat bekerja lebih optimal, responsif, dan andal (IEEE Power Engineering Society, 1987) .

g. Hasil Pengujian Thermal Overload Protection

Thermal Overload Protection merupakan sistem proteksi yang digunakan untuk melindungi motor induksi dari kondisi beban lebih (overload) yang dapat menyebabkan kenaikan temperatur pada lilitan motor. Proteksi ini bekerja berdasarkan akumulasi panas yang timbul akibat arus beban melebihi kemampuan nominal motor dalam jangka waktu tertentu. Jika kondisi tersebut berlangsung terus-menerus, temperatur motor akan meningkat dan berpotensi merusak isolasi lilitan maupun komponen internal motor lainnya (Ferreira et al., 2025) .

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kesesuaian karakteristik kerja relay thermal overload terhadap arus injeksi yang diberikan selama proses pengujian berlangsung. Melalui pengujian ini dapat diketahui apakah relay mampu bekerja sesuai setting yang telah ditentukan serta mampu memberikan perlindungan yang optimal terhadap motor induksi ketika terjadi kondisi overload.

Parameter yang diuji meliputi arus injeksi primer, arus injeksi sekunder, dan waktu operasi relay (trip time). Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi arus injeksi untuk melihat respon relay terhadap peningkatan beban termal pada motor.

Relay dirancang untuk mendeteksi kenaikan temperatur motor akibat arus beban lebih secara bertahap sesuai karakteristik termal motor. Selain itu, pengaturan nilai thermal value dan time constant bertujuan agar relay mampu menyesuaikan respon proteksi dengan kondisi operasi motor saat starting, running, maupun setelah motor berhenti beroperasi. Hasil pengujian Thermal Overload Protection dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian Thermal Overload Protection

I Setting	I Primer (A)	I Sekunder (A)	Actual Time (s)	Status
4	416	10,4	5,8	Baik
4,5	468	11,7	4,592	Baik
5	520	13	3,693	Baik
6	624	15,6	2,519	Baik
7	728	18,2	1,853	Baik

Berdasarkan hasil pengujian pada tabel 8, relay thermal overload menunjukkan karakteristik operasi yang sesuai dengan prinsip kerja proteksi termal pada motor induksi. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa semakin besar arus injeksi yang diberikan, maka waktu operasi (trip time) relay menjadi semakin cepat.

Pada pengujian dengan arus injeksi primer sebesar 416 A dan arus sekunder 10,4 A, relay bekerja dengan waktu trip sebesar 5,8 detik. Ketika arus injeksi dinaikkan menjadi 468 A, waktu operasi relay menurun menjadi 4,592 detik. Selanjutnya, pada arus injeksi sebesar 520 A diperoleh waktu operasi relay sebesar 3,693 detik.

Pengujian dengan arus yang lebih besar menunjukkan respon relay yang semakin cepat. Pada arus injeksi 624 A, relay bekerja dalam waktu 2,519 detik, sedangkan pada arus injeksi 728 A waktu operasi relay menjadi 1,853 detik. Karakteristik tersebut menunjukkan bahwa relay bekerja sesuai prinsip inverse time, yaitu semakin besar arus gangguan yang terjadi maka semakin cepat relay memberikan perintah trip.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa relay thermal overload protection masih mampu mendeteksi kondisi beban lebih (overload) dan merespon gangguan dengan baik sesuai karakteristik setting yang telah ditentukan. Selama proses pengujian berlangsung juga tidak ditemukan penyimpangan waktu operasi yang signifikan, sehingga seluruh hasil pengujian dinyatakan Baik.

Kondisi overload yang terjadi dalam waktu lama dapat menyebabkan arus beban tinggi mengalir terus-menerus pada motor. Hal tersebut akan meningkatkan temperatur rotor dan stator secara bertahap sehingga dapat menurunkan kualitas isolasi lilitan motor (Ferreira et al., 2025) . Jika tidak segera diamankan oleh sistem proteksi, kondisi tersebut dapat mempercepat terjadinya kerusakan pada motor induksi (Munteanu et al., 2025) .

Jika dibandingkan dengan karakteristik proteksi motor induksi berdasarkan standar IEC 60947-4-1 dan IEEE C37.96, relay thermal overload protection seharusnya memiliki karakteristik waktu trip yang berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Tujuannya adalah untuk mencegah terjadinya overheating pada motor induksi akibat kondisi overload yang berkepanjangan (IEEE Power Engineering Society, 1987) . Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, relay thermal overload masih bekerja sesuai karakteristik standar sehingga sistem proteksi motor dapat dinyatakan dalam kondisi baik, optimal, dan andal.

h. Evaluasi Sistem Proteksi

Evaluasi sistem proteksi dilakukan untuk mengetahui tingkat keandalan serta kesesuaian kerja seluruh sistem proteksi pada motor induksi 6 kV berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan sebelumnya. Evaluasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa setiap perangkat proteksi mampu bekerja sesuai karakteristik setting yang telah ditentukan sehingga motor tetap terlindungi dari berbagai jenis gangguan selama beroperasi (Wafiq et al., 2023) .

Evaluasi dilakukan terhadap beberapa sistem proteksi utama, meliputi pengujian Circuit Breaker, Ground Fault Relay (GFR), Overcurrent Relay (OCR), Current Unbalance Protection, Acceleration Time Protection, dan Thermal Overload Protection. Setiap pengujian dianalisis berdasarkan kesesuaian nilai setting, hasil pengukuran aktual, waktu operasi relay, serta karakteristik respon proteksi terhadap gangguan yang disimulasikan.

Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, sebagian besar sistem proteksi menunjukkan kinerja yang baik dan masih bekerja sesuai standar operasi yang ditentukan. Namun, terdapat beberapa parameter terutama pada waktu operasi relay yang masih memerlukan evaluasi dan penyesuaian agar koordinasi sistem proteksi dapat bekerja lebih optimal dan responsif terhadap gangguan [Sitha & Khodijah, 2025) . Hasil evaluasi sistem proteksi secara keseluruhan dapat dilihat pada tabel 9.

Tabel 9. Evaluasi Sistem Proteksi Motor Induksi 6 kV

No	Pengujian	Hasil	Status
1	Circuit Breaker – Contact Resistance	Nilai tahanan kontak sesuai standar	Baik
2	Circuit Breaker – Timing Test	Waktu operasi sesuai standar	Baik
3	Ground Fault Relay (GFR)	Relay bekerja sesuai setting	Baik
4	Overcurrent Relay (OCR)	Relay bekerja sesuai karakteristik	Baik
5	Current Unbalance Protection	Error waktu melebihi acceptance	Tidak Baik
6	Acceleration Time Protection	Error waktu melebihi acceptance	Tidak Baik
7	Thermal Overload Protection	Karakteristik inverse time sesuai standar	Baik

Berdasarkan hasil evaluasi pada Tabel 9, sebagian besar sistem proteksi motor induksi 6 kV masih bekerja sesuai fungsi dan karakteristik proteksi yang diharapkan. Hasil pengujian pada Circuit Breaker, Ground Fault Relay (GFR), Overcurrent Relay (OCR), dan Thermal Overload Protection menunjukkan bahwa nilai pengukuran dan waktu operasi relay masih berada dalam batas standar yang ditentukan. Hal tersebut menunjukkan bahwa sistem proteksi masih dalam kondisi baik, layak digunakan, dan mampu bekerja secara andal dalam melindungi motor induksi dari gangguan kelistrikan.

Namun demikian, pada pengujian Current Unbalance Protection dan Acceleration Time Protection ditemukan adanya nilai error pada waktu operasi relay yang melebihi batas acceptance. Kondisi ini menunjukkan bahwa respon waktu relay belum sepenuhnya sesuai dengan setting yang telah ditentukan. Ketidaksesuaian tersebut dapat mempengaruhi kecepatan sistem proteksi dalam mendeteksi gangguan sehingga diperlukan evaluasi dan penyesuaian lebih lanjut, terutama pada parameter waktu operasi relay agar sistem proteksi dapat bekerja lebih cepat, tepat, dan akurat.

Secara keseluruhan, sistem proteksi motor induksi 6 kV masih mampu memberikan perlindungan terhadap berbagai jenis gangguan kelistrikan yang dapat terjadi selama motor beroperasi. Akan tetapi, untuk menjaga keandalan dan performa sistem proteksi dalam jangka panjang, diperlukan pemeriksaan, pengujian, dan kalibrasi relay secara berkala. Langkah tersebut penting dilakukan agar seluruh parameter proteksi tetap sesuai dengan standar operasi dan karakteristik proteksi motor induksi berdasarkan standar IEEE C37.96 dan IEC 60255 (Bonetti, 2021), (IEEE Power Engineering Society, 1987) .

4. Kesimpulan

Motor induksi 6 kV pada sistem High Pressure Boiler Feed Pump memiliki peranan penting sebagai penggerak pompa air bertekanan tinggi menuju boiler, sehingga memerlukan sistem proteksi yang andal untuk menjaga kontinuitas operasi pembangkit listrik. Berdasarkan hasil perhitungan, arus nominal motor diperoleh sebesar 283,04 A. Nilai ini digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kesesuaian setting relay proteksi, khususnya pada proteksi arus lebih, thermal overload, dan acceleration time protection. Hasil pengujian circuit breaker melalui contact resistance test dan timing test menunjukkan bahwa kondisi pemutus tenaga masih baik. Nilai tahanan kontak antar fasa masih rendah dan waktu kerja circuit breaker masih berada dalam batas normal, sehingga circuit breaker layak digunakan sebagai bagian dari sistem proteksi motor induksi 6 kV. Pengujian Ground Fault Relay (GFR) menunjukkan hasil yang baik, dengan nilai error arus sebesar 2% dan error waktu operasi sebesar 0,001 s. Kedua nilai tersebut masih berada di bawah batas acceptance, sehingga GFR dinyatakan masih mampu mendeteksi gangguan hubung tanah secara cepat, sensitif, dan akurat. Overcurrent Relay (OCR) menunjukkan bahwa parameter arus masih sesuai dengan setting yang ditentukan, dengan error sebesar 0,11%. Namun, pada parameter waktu operasi diperoleh error sebesar 24 ms, yang melebihi batas acceptance sebesar 20 ms, sehingga diperlukan evaluasi dan penyesuaian pada setting waktu OCR agar koordinasi proteksi tetap optimal. Pada pengujian Current Unbalance Protection, parameter arus masih berada dalam kondisi baik dengan error sebesar 1,82%. Namun, error waktu operasi sebesar 0,033 s melebihi batas acceptance sebesar 0,02 s, sehingga perlu dilakukan evaluasi lebih lanjut agar relay dapat merespons gangguan ketidakseimbangan arus dengan lebih tepat. Pengujian Acceleration Time Protection menunjukkan bahwa parameter arus masih sesuai dengan setting, dengan error sebesar 1,48%. Akan tetapi, error waktu operasi sebesar 0,034 s melebihi batas acceptance sebesar 0,02 s, sehingga diperlukan penyesuaian setting waktu agar relay mampu mendeteksi kegagalan percepatan motor atau locked rotor secara lebih akurat. Hasil pengujian Thermal Overload Protection menunjukkan bahwa relay masih bekerja sesuai karakteristik inverse time, yaitu semakin besar arus injeksi yang diberikan, maka semakin cepat waktu trip relay. Hal ini menunjukkan bahwa proteksi thermal overload masih bekerja dengan baik dalam melindungi motor dari kondisi beban lebih. Secara keseluruhan, sistem proteksi motor induksi 6 kV pada High Pressure Boiler Feed Pump masih dalam kondisi baik dan layak digunakan. Namun, beberapa parameter waktu operasi relay, khususnya pada OCR, Current Unbalance Protection, dan Acceleration Time Protection, perlu dievaluasi dan dikalibrasi ulang untuk meningkatkan selektivitas, keandalan, serta mencegah terjadinya trip yang tidak diinginkan. Untuk menjaga keandalan sistem proteksi dalam jangka panjang, perlu dilakukan pemeriksaan, pengujian, dan kalibrasi relay secara berkala agar seluruh parameter proteksi tetap sesuai dengan karakteristik operasi motor serta standar proteksi yang berlaku.

Referensi

1. "IEEE Power Engineering Society," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. c2–c2, 1987, doi: 10.1109/TPWRS.1987.4335061.
2. A. Bonetti, "PPT - The IEC standardization of protection relays/functions (IEC 60255-1xx series)," 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.15595.87844/1.
3. A. Chakraborty, M. S. Hossain, and T. Zuhair, "A Constructive Performance Analysis of Pumps in Thermal Power Plant," *ejaset*, vol. 4, no. 2, pp. 25–61, Feb. 2026, doi: 10.59324/ejaset.2026.4(2).03.
4. A. Cogburn and P. Bhattarai, "Amplification of Current Unbalance Due to Induction Motors," in *2023 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, San Francisco, CA, USA: IEEE, May 2023, pp. 1–7. doi: 10.1109/IEMDC55163.2023.10239025.
5. A. Jácome-Barrionuevo, M. Quizhpi-Cuesta, and F. Quizhpi-Palomeque, "Protection settings in a distribution system with a medium voltage motor as load," in *2024 3rd International Conference on Power Systems and Electrical Technology (PSET)*, Tokyo, Japan: IEEE, Aug. 2024, pp. 568–575. doi: 10.1109/PSET62496.2024.10808519.
6. A. W. Indrawan, Purwito, A. Ashar, A. R. Sultan, and S. Imanulloh, "A Boiler Feed Pump Speed Control to Reduce Its Own Power Consumption According to Pump Affinity Law," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1209, no. 1, p. 012029, Jul. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1209/1/012029.
7. F. Arifuddin, "Analisis Penggunaan Phase Failure Relay Terhadap Unbalance Voltage pada Instalasi Motor Tiga Fasa," *IRWNS*, vol. 14, no. 1, pp. 1–5, Aug. 2023, doi: 10.35313/irwns.v14i1.5351.
8. F. J. T. E. Ferreira, J. M. Alberto, and A. T. De Almeida, "Assessment of Induction Motor Tolerance to Supply Voltage Unbalance for Different Dual-Winding Configurations," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 40, no. 1, pp. 233–245, Mar. 2025, doi: 10.1109/TEC.2024.3439192.
9. F. V. Ghozlizar, S. Handoko, and I. Setiawan, "IMPLEMENTASI SISTEM PROTEKSI ARUS PADA MOTOR INDUKSI 3 FASA UNTUK APLIKASI SISTEM KONVEYOR TERKENDALI," *Transient*, vol. 10, no. 1, pp. 190–195, Mar. 2021, doi: 10.14710/transient.v10i1.190-195.
10. G. A. Ibrahimusa, J. Joko, T. Wrahatnolo, and A. I. Agung, "Analisis Koordinasi Setting Relay Proteksi Pada Jaringan Distribusi 20 kV di PT. PLN UP3 Kediri Gardu Induk Pare," *JTE*, vol. 12, no. 1, pp. 28–36, Jan. 2023, doi: 10.26740/jte.v12n1.p28-36.
11. G. Zanuso and L. Peretti, "Accelerated Aging Procedure and Online Method for Stator Insulation Monitoring of Induction Motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 38, no. 1, pp. 685–692, Mar. 2023, doi: 10.1109/TEC.2022.3214061.
12. H. Masdi, Mutia Tsari, and Rini Nur Hasanah, "Evaluasi Selektivitas dan Keandalan Relai OCR dan GFR pada Sistem Proteksi Jaringan Distribusi," *SNTE*, vol. 4, no. 1, pp. 353–359, Sep. 2025, doi: 10.46962/snte.25.061.
13. I.-C. Munteanu, E. Cazacu, and S.-V. Pușcașu, "Induction Motor Behavior Under Specific Fault Conditions in Industrial Electric Drive Systems," in *2025 14th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania: IEEE, Oct. 2025, pp. 1–6. doi: 10.1109/ATEE66006.2025.11299979.
14. J. Hu, Y. Cui, A. Roberts, and J. McGuire, "Ground Fault Monitoring for Motor-Drive Systems with High Resistance Grounding," in *2023 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, San Francisco, CA, USA: IEEE, May 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/IEMDC55163.2023.10238990.
15. K. Laadjal, M. Sahraoui, A. Alloui, and A. J. M. Cardoso, "Three-Phase Induction Motors Online Protection against Unbalanced Supply Voltages," *Machines*, vol. 9, no. 9, p. 203, Sep. 2021, doi: 10.3390/machines9090203.
16. M. Otong and M. I. Albantani, "Analisis Sistem Proteksi Motor Induksi 6KV Pada Circulating Water Pump (CWP) Menggunakan Relay Overcurrent dan Short Circuit Unit 1-4 PT. PLN Indonesia Power UBP Suralaya," *JIS*, vol. 13, no. 2, p. 150, Dec. 2024, doi: 10.62870/setrum.v13i2.29800.
17. M. Ridho, P. Siagian, and Z. Tharo, "ANALISIS FREKUENSI GANGGUAN TERHADAP KINERJA SISTEM PROTEKSI GARDU INDUK 150 KV SIEMPAT RUBE," *JITET*, vol. 12, no. 3S1, Oct. 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3S1.5321.
18. M. Wafiq, M. Giatman, and F. Rifwan, "Evaluasi Sistem Proteksi Kebakaran pada Gedung Kemuning RSUD Dr. Adnaan WD Kota Payakumbuh," *CIVED*, vol. 10, no. 2, pp. 339–347, Jun. 2023, doi: 10.24036/cived.v10i2.389.
19. N. S. Sitha and S. Khodijah, "Evaluasi Efisiensi Sistem Proteksi pada Jaringan Distribusi Tegangan Menengah," *JOEER*, vol. 1, no. 2, pp. 48–55, May 2025, doi: 10.64803/joeer.v1i2.7.
20. P. Schegner, "Power System Protection," in *Springer Handbook of Power Systems*, K. O. Papailiou, Ed., in Springer Handbooks. , Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 975–1014. doi: 10.1007/978-981-32-9938-2_13.
21. R. R. Setyabudi and Denny Irawan, "OPTIMALISASI SETTING PROTEKSI PANEL SWITCHGEAR 11,5 KV DENGAN IMPLEMENTASI RELAY SIEMENS 7SJ80 DI PT XYZ," *E-LINK*, vol. 20, no. 2, pp. 82–91, Feb. 2026, doi: 10.30587/e-link.v20i2.11263.
22. R. Rahmani, A. A. Niaki, and S. H. Hesamedin Sadeghi, "Large Induction Motor Starting Time Determination for The Purpose of Protection Coordination," in *2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Yazd, Iran: IEEE, Apr. 2019, pp. 475–480. doi: 10.1109/IranianCEE.2019.8786579.
23. S. Asefi *et al.*, "Measurement and Operation Based Condition Monitoring Methodology for High Voltage Circuit Breakers," in *2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, Novi Sad, Serbia: IEEE, Oct. 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960521.
24. S. Hartanto, T. O. Priyono, R. Pahlavi, and D. Benoît, "Performance Testing of Power Breaker 20 kV at the Senayan PLTMG Substation Netto Cubicles," *Sciencetechno: J. of Science and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 201–211, Dec. 2023, doi: 10.55849/sciencetechno.v2i3.503.
25. S. Shaikh, D. Kumar, A. Hakeem, and A. M. Soomar, "Protection System Design of Induction Motor for Industries," *Modelling and Simulation in Engineering*, vol. 2022, pp. 1–13, Aug. 2022, doi: 10.1155/2022/7423018.
26. T. Dimova, "Investigation of Digital Protection Relay For Three-Phase Induction Motor," in *2021 17th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, Sofia, Bulgaria: IEEE, Jul. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/ELMA52514.2021.9503040.
27. Z. Adha and A. Kurniawan, "Calculation of High Pressure Heater Efficiency in the Feedwater System of PT PLN IP Teluk Sirih Unit 2 Steam Power Plant," vol. 8, no. 1, 2026.