

Rancang Bangun Sistem Proteksi *Over Current* Relay Dengan Karakteristik *Inverse* Sesuai IEC 60255 Terintegrasi IoT Untuk Monitoring Jarak Jauh

Anissa Suprihatin¹, Misbahul Munir²

^{1,2}. D4 Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Universitas Negeri Malang
Malang, Indonesia

anissa.suprihatin.2205317@students.um.ac.id

Abstrak

Penelitian ini membahas perancangan dan pengembangan prototipe sistem proteksi over current relay (OCR) berbasis mikrokontroler ESP32 dengan karakteristik inverse sesuai standar IEC 60255 yang terintegrasi Internet of Things (IoT) untuk monitoring jarak jauh. Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan industri menengah terhadap perangkat proteksi arus lebih yang andal namun tetap ekonomis, karena OCR konvensional berstandar industri umumnya mahal dan belum seluruhnya dilengkapi fitur pemantauan real-time. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan sensor PZEM-004T untuk mengukur parameter kelistrikan, meliputi tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Data hasil pengukuran diolah oleh ESP32 untuk menghitung Plug Setting Multiplier (PSM) dan menentukan waktu kerja relay berdasarkan kurva Standard Inverse, Very Inverse, dan Extremely Inverse sesuai IEC 60255. Proses trip dilakukan melalui relay daya dan buzzer sebagai indikator gangguan, sedangkan data parameter listrik dan status proteksi ditampilkan pada LCD I2C 20×4 serta dikirim secara real-time ke platform Blynk IoT sehingga dapat dimonitor dan di-reset melalui smartphone. Pengujian dilakukan pada beban resistif dan dinamis dalam rentang arus 1–20 A untuk mengevaluasi akurasi pembacaan sensor, kesesuaian waktu trip terhadap perhitungan teoritis, dan keandalan komunikasi IoT. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja sesuai karakteristik inverse IEC 60255 dengan rata-rata error waktu trip di bawah 10%. Semakin besar arus gangguan maka waktu trip relay semakin cepat. Secara umum, prototipe yang dikembangkan dapat menjadi alternatif OCR digital low-cost yang informatif, fleksibel, dan mudah diintegrasikan pada sistem proteksi industri menengah.

Kata kunci: arus lebih, ESP32, inverse, IoT, proteksi.

Abstract

This research aims to design and develop a prototype overcurrent relay (OCR) protection system based on the ESP32 microcontroller that implements inverse-time characteristics in accordance with IEC 60255 and is integrated with the Internet of Things (IoT) for remote monitoring. The work is motivated by the need of medium-scale industries for reliable yet economical overcurrent protection devices, since conventional industrial OCRs are generally expensive and not fully equipped with real-time monitoring capabilities. The proposed system employs a PZEM-004T module to measure electrical parameters including voltage, current, power, energy, frequency, and power factor. These measurements are processed by the ESP32 to calculate the Plug Setting Multiplier (PSM) and determine the relay operating time based on three IEC 60255 inverse curves, namely Standard Inverse, Very Inverse, and Extremely Inverse. Trip decisions are executed through a power relay and buzzer as alarm indicators, while electrical parameters and protection status are displayed on an I2C 20×4 LCD and transmitted in real time to the Blynk IoT platform, enabling monitoring and remote reset via smartphone. Experimental tests on resistive and dynamic loads within a current range of 1–20 A were conducted to evaluate sensor accuracy, conformity of trip time with theoretical inverse curves, and the reliability of IoT communication. Overall, the developed prototype is expected to serve as a low-cost digital OCR alternative that is more informative, flexible, and easy to integrate into protection systems for medium-scale industrial loads.

Keywords: overcurrent relay, ESP32, inverse, IoT, protection.

I. PENDAHULUAN

Dalam sistem tenaga listrik, proteksi arus lebih (*overcurrent protection*) merupakan salah satu elemen paling penting untuk menjaga keandalan dan keselamatan operasi peralatan [1][2]. Gangguan arus lebih yang tidak ditangani secara cepat dapat menyebabkan *overheat*, kerusakan isolasi, kegagalan peralatan, hingga potensi kebakaran [3]. Pada sektor industri menengah, beban listrik seperti motor induksi, pompa, blower, atau mesin berbasis motor listrik sangat bergantung pada kinerja sistem proteksi yang responsif dan akurat [4]. Oleh karena itu, *over current relay* (OCR) memiliki peran strategis dalam mengamankan proses produksi dan mencegah kerugian operasional [5][6].

Namun, permasalahan yang sering ditemukan di lapangan adalah tingginya harga OCR konvensional yang berstandar industri, terutama yang mendukung pengaturan karakteristik *inverse time* [7][8]. Di instalasi pembangkit dan industri skala besar, sistem proteksi umumnya telah terintegrasi dengan SCADA sehingga kondisi relay dapat dimonitor secara jarak jauh [9]. Namun, pada banyak instalasi industri menengah, *over current relay* yang digunakan masih bersifat mandiri dan belum terhubung dengan sistem pemantauan *real-time* [10][11]. Akibatnya, informasi parameter arus, tegangan, dan status gangguan sering kali hanya diketahui saat terjadi *trip*, sehingga respon terhadap gangguan menjadi kurang cepat dan kurang informatif [12].

Perkembangan teknologi mikrokontroler memberikan peluang untuk menghadirkan solusi proteksi yang lebih terjangkau namun tetap reliabel [13]. ESP32 merupakan mikrokontroler yang memiliki kemampuan pemrosesan yang cepat, konsumsi daya rendah, serta konektivitas Wi-Fi bawaan yang memungkinkan integrasi langsung dengan sistem *Internet of Things (IoT)* [14][15]. Penggunaan sensor arus *Current Transformer (CT)* dan modul PZEM-004T juga mendukung pengambilan data arus dan tegangan secara *real-time* dengan akurasi yang memadai [16]. Dengan demikian, kombinasi ESP32, CT, dan PZEM menjadi solusi potensial untuk merancang *over current relay* digital *low-cost* dengan fitur monitoring modern.

Salah satu aspek terpenting dari *over current relay* adalah penerapan karakteristik *inverse* sesuai standar IEC 60255, yang meliputi kurva *Standard Inverse*, *Very Inverse*, dan *Extremely Inverse* [17][18]. Karakteristik ini umum digunakan untuk koordinasi proteksi sistem tenaga listrik karena mampu menyesuaikan waktu *trip* terhadap tingkat arus lebih, sehingga memberikan proteksi terarah dan menghindari *trip* yang tidak perlu [19][20].

Mengimplementasikan karakteristik *inverse* ini langsung pada mikrokontroler memberikan tantangan tersendiri, terutama dalam menjaga akurasi waktu *trip* agar mendekati nilai teoritis.

Selain fungsi proteksi, integrasi IoT dengan OCR digital memberikan nilai tambah yang signifikan [21]. Dengan memanfaatkan platform Blynk, parameter kelistrikan seperti arus, tegangan, daya, konsumsi energi, faktor daya, frekuensi, serta status *trip* dapat dipantau secara jarak jauh melalui jaringan Wi-Fi [22]. Hal ini memberikan efisiensi dan ketepatan dalam proses identifikasi gangguan, terutama bagi industri menengah yang membutuhkan pemantauan cepat untuk mengurangi *downtime*.

Berdasarkan penelitian sebelumnya [23], sebagian besar sistem proteksi *over current relay* hanya berfokus pada satu jenis karakteristik kurva *inverse* dan belum terintegrasi dengan sistem monitoring berbasis *Internet of Things (IoT)*. Selain itu, beberapa penelitian hanya diterapkan pada sistem satu fasa sehingga belum mendukung pengujian pada sistem tiga fasa secara bersamaan. Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan sistem proteksi *over current relay* dengan karakteristik *inverse* sesuai IEC 60255 yang dapat dioperasikan pada sistem satu fasa dan tiga fasa serta terintegrasi IoT untuk monitoring jarak jauh secara *real-time*.

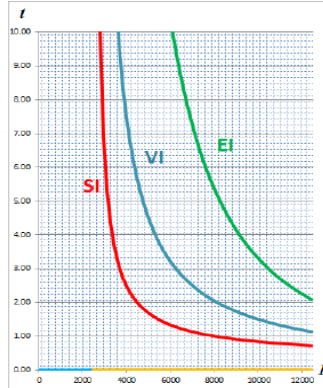
Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu penelitian untuk merancang dan mengembangkan prototipe OCR digital berbasis ESP32 yang dapat menjadi alternatif *low cost* bagi OCR konvensional. Sistem ini diharapkan mampu menerapkan karakteristik *inverse* IEC 60255 secara akurat, menyediakan monitoring parameter listrik secara komprehensif, serta menghadirkan fitur IoT sebagai keunggulan tambahan. Dengan melakukan pengujian pada beban resistif dan dinamis dalam rentang arus 1–20 A serta membandingkan hasilnya dengan nilai teoritis, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi nyata dalam pemanfaatan teknologi proteksi murah dan fleksibel bagi industri menengah.

II. METODE PENELITIAN

A. Karakteristik Kurva Inverse

Karakteristik kurva *inverse* pada *over current relay* (OCR) berfungsi mengatur waktu kerja relay berdasarkan besarnya arus gangguan [24]. Semakin tinggi arus yang melewati relay, semakin singkat waktu *trip* yang dihasilkan untuk melindungi peralatan dari kerusakan. Mekanisme ini menghasilkan proteksi yang lebih selektif karena operasi relay tidak hanya dipicu oleh nilai arus absolut, tetapi oleh perbandingan antara arus gangguan dan arus *setting* [25][26]. Dengan

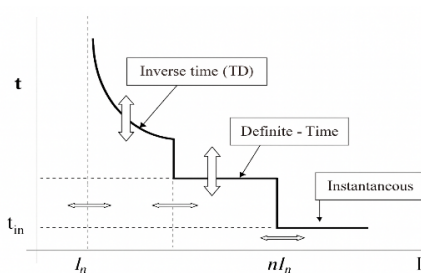
demikian, sistem proteksi dapat bekerja lebih efisien dalam menjaga stabilitas jaringan distribusi.



Gambar 2.1 Kurva Inverse

Standar IEC 60255 mengelompokkan kurva *inverse* menjadi beberapa jenis, yaitu *Standard Inverse* (SI), *Very Inverse* (VI), dan *Extremely Inverse* (EI), masing-masing memiliki pola respons waktu yang berbeda terhadap peningkatan arus gangguan [27]. Pemilihan jenis kurva bergantung pada karakteristik sistem dan kebutuhan koordinasi proteksi, misalnya VI sering diterapkan pada feeder dengan beban besar, sedangkan EI lebih sesuai untuk transformator yang membutuhkan pemutusan gangguan secara cepat dan agresif [28].

Kurva karakteristik operasi relay arus lebih waktu inverse digambarkan dalam hubungan antara arus dan waktu atau dikenal sebagai *time-current characteristic* (TCC) [29]. Karakteristik inverse tersebut mengacu pada standar IEC 60255, pada karakteristik ini dijelaskan beberapa jenis perlindungan waktu *inverse* yang dibedakan oleh gradien kurva yaitu *standar inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*, karena semakin besar arus gangguan yang mengalir, maka waktu kerja relay akan semakin singkat hingga mendekati batas waktu minimum tertentu. Relay dengan karakteristik IDMT memiliki beberapa jenis kurva penundaan waktu operasi, yaitu kurva *instantaneous*, *definite time*, dan *inverse time* [30]. Kurva tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2 di bawah ini:



Gambar 2.1 Tipe Kurva Penundaan Waktu Relay IDMT [31]

Relay IDMT memiliki dua parameter utama dalam proses pengaturan, yaitu pengaturan arus dan pengaturan *time dial*. Pengaturan arus digunakan untuk menentukan batas arus kerja relay, sedangkan pengaturan *time dial* digunakan untuk menentukan

waktu operasi relay. Berdasarkan British Standard 142 tentang *electrical protection relays* batas pengaturan I_{set} adalah:

$$1,05 \times FLA < I_{set} < 1,4 \times FLA$$

Keterangan:

FLA = Arus beban saat operasi atau sedang bekerja

Sedangkan untuk *setting time dial* digunakan untuk menentukan waktu operasi relay. Adapun persamaan karakteristik waktu operasi relay *inverse* dapat dituliskan sebagai berikut:

$$t(I) = TMS \left(\frac{k}{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^n - 1} \right) \quad (1)$$

$$\text{Dengan } PSM = \left(\frac{I}{I_{set}} \right) \quad (2)$$

Tabel 2.1 Rumus *Inverse Time* berdasarkan IEC 60255

Tipe Kurva	k	α
<i>Standart Inverse</i>	0,14	0,02
<i>Very Inverse</i>	13,5	1
<i>Extremely Inverse</i>	80	2

Keterangan:

t = Waktu operasi

I = Arus beban (Ampere)

I_{set} = Arus *setting* relay (Ampere)

TMS = *Time Multiplier Setting*

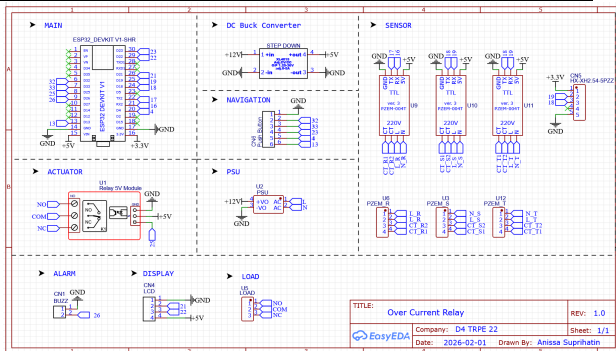
α, k = Koefisien *inverse*

Pada persamaan tersebut, I_{set} merupakan arus *setting* atau *pickup current*, sedangkan I adalah arus gangguan, dan TMS berfungsi mengatur besarnya waktu tunda operasi relay. Melalui hubungan ini, peningkatan rasio antara arus gangguan dan arus *setting* akan menghasilkan waktu *trip* yang lebih singkat. Hal ini memungkinkan tercapainya koordinasi proteksi yang selektif, sehingga hanya bagian jaringan yang mengalami gangguan yang diputus, sementara bagian lain yang masih normal tetap memperoleh pasokan listrik.

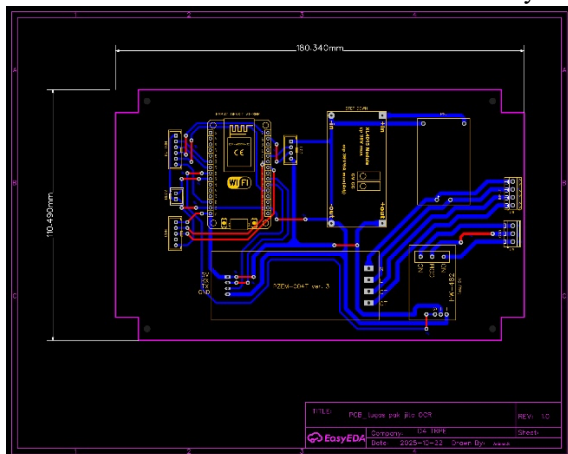
B. Perancangan

Schematic over current relay ini dirancang untuk membentuk satu sistem proteksi arus berbasis mikrokontroler. Sistem bekerja dengan membaca arus dan tegangan dari jaringan listrik menggunakan sensor PZEM-004T, kemudian memproses data tersebut di ESP32 untuk menentukan apakah arus yang mengalir telah melewati batas yang diizinkan atau tidak. Ketika kondisi *over current* terdeteksi, ESP32 mengaktifkan relay modul sebagai pemutus beban dan menyalakan buzzer sebagai alarm.

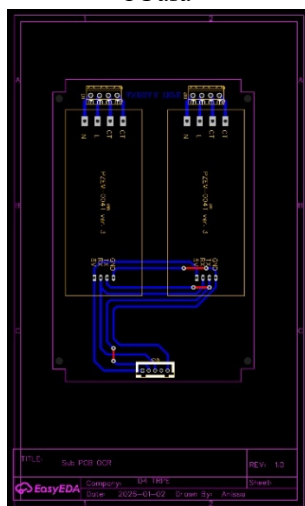
Nama Alat	Keterangan
Sensor PZEM-004T	Digunakan untuk mengukur parameter listrik AC seperti tegangan, arus, daya, energi, faktor daya, dan frekuensi.
ESP32	Berfungsi untuk mengolah data arus dan mengatur logika proteksi
Relay	Berfungsi untuk memutus aliran listrik secara otomatis saat terjadi gangguan
LCD I2C 20x4	Digunakan untuk menampilkan status sistem dan parameter proteksi



Gambar 2.3 Schematic Over Current Relay



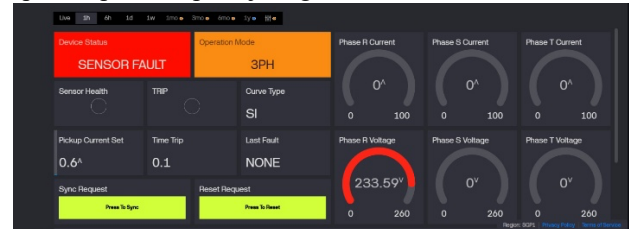
Gambar 2.4 PCB Layout Over Current Relay pada Sistem 1 Fasa



Gambar 2.5 PCB Layout Over Current Relay pada Sistem 3 Fasa

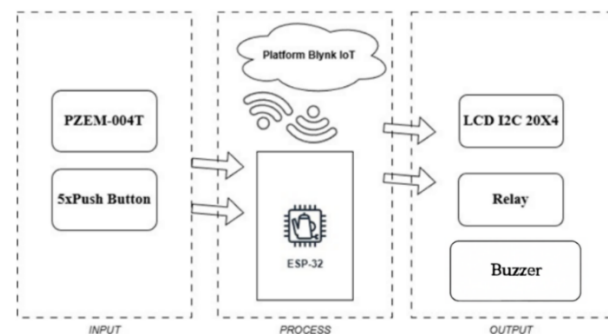
Tabel 2.2 Fungsi masing-masing komponen

Desain alat ini memungkinkan sistem proteksi arus lebih bekerja secara otomatis dan akurat sesuai karakteristik *inverse* IEC 60255, serta memberikan kemudahan monitoring dan pengendalian melalui platform IoT. Implementasi sensor arus yang presisi, mikrokontroler yang dapat diprogram, serta integrasi terhadap *Internet of Things* menjadikan sistem ini adaptif untuk berbagai aplikasi proteksi pada jaringan distribusi listrik modern.



Gambar 2.6 Tampilan perangkat lunak pada Blyn

C. Metode Analisis



Gambar 2.7 Blok Diagram

1. Input

Bagian input terdiri dari modul PZEM-004T dan 5 *push button*. PZEM-004T berperan sebagai sensor yang dapat mengukur besaran listrik pada beban, meliputi arus, tegangan, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Parameter ini dikirimkan ke ESP32 melalui komunikasi UART sehingga kondisi beban dapat dipantau secara *real-time*. Sementara itu, *push button* digunakan sebagai media interaksi pengguna untuk mengatur parameter proteksi seperti nilai arus *setting* (I_{set}), nilai TMS, pemilihan jenis kurva, serta navigasi menu lain yang ditampilkan pada LCD. Dengan demikian, blok input menyediakan seluruh data dan perintah yang dibutuhkan agar sistem dapat melakukan proses pengambilan keputusan proteksi.

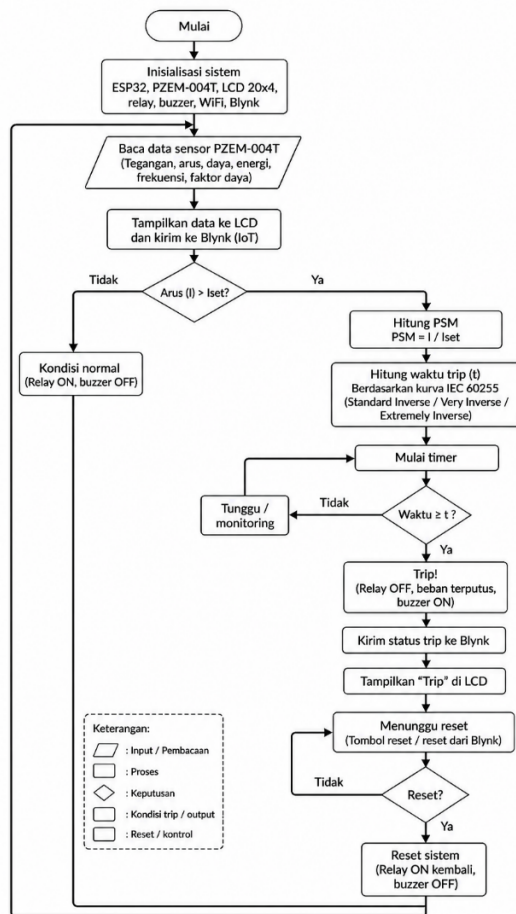
2. Proses

Blok proses diwakili oleh ESP32 yang berfungsi sebagai pusat kendali sistem. Pada bagian ini, data dari PZEM-004T diolah untuk menghitung besar arus relatif terhadap I_{set} dan menentukan apakah kondisi masuk kategori *over current*. ESP32 kemudian menerapkan persamaan kurva *inverse* IEC 60255 untuk menghitung waktu *trip* berdasarkan parameter TMS dan jenis kurva yang dipilih. Selain menjalankan logika proteksi, ESP32 juga mengelola

tampilan menu pada LCD, membaca input tombol, serta melakukan komunikasi dengan platform Blynk IoT melalui koneksi WiFi. Data hasil pengukuran dan status sistem dikirim ke Blynk sehingga pengguna dapat memantau kondisi beban dan relay secara jarak jauh.

3. Output

Blok output terdiri dari LCD I2C 20×4, relay, dan buzzer. LCD berfungsi menampilkan informasi utama seperti nilai arus dan tegangan, parameter *setting* proteksi, serta status sistem (normal atau *trip*). Relay bertindak sebagai aktuator yang memutuskan atau menghubungkan beban ketika perhitungan pada blok proses menyatakan bahwa waktu *trip* telah tercapai, ESP32 mengubah keadaan relay sehingga beban terputus dari sumber. Buzzer diaktifkan sebagai indikator alarm ketika terjadi gangguan atau kondisi *trip* sehingga operator mendapat peringatan langsung. Kombinasi ketiga output ini memastikan bahwa hasil pemrosesan sistem tidak hanya tercermin pada tindakan proteksi fisik, tetapi juga pada informasi tampilan yang mudah dipantau pengguna.



Gambar 2.8 Flowchart Sistem

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian sensor PZEM-004T

Pada tahap ini pengujian sensor PZEM-004T dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur referensi berupa multimeter digital. Pengujian dilakukan pada beberapa variasi beban untuk mengetahui tingkat akurasi pembacaan tegangan dan arus.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Akurasi Sensor PZEM-004T

Tegangan Referensi (V)	Tegangan Sensor (V)	Error Tegangan (%)	Arus Referensi (A)	Arus Sensor (A)	Error Arus (%)
220	219.4	0.27	1.20	1.18	1.67
220	219.8	0.09	2.50	2.47	1.20
221	220.5	0.23	4.00	3.95	1.25
221	220.6	0.18	6.50	6.41	1.38
222	221.4	0.27	8.00	7.90	1.25
222	221.6	0.18	10.00	9.86	1.40

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 4.1, diperoleh bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang baik dengan error pengukuran tegangan di bawah 0,3% dan error arus rata-rata di bawah 1,5%. Hal ini menunjukkan bahwa sensor layak digunakan sebagai perangkat akuisisi data pada sistem proteksi *over current* relay.

B. Pengujian beban motor 1 fasa dan 3 fasa

Pengujian dilakukan menggunakan beban motor induksi 1 fasa dan motor induksi 3 fasa untuk mengetahui kemampuan sistem dalam membaca parameter kelistrikan dan mendeteksi kondisi arus lebih pada berbagai jenis beban.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Motor 1 Fasa

Tegangan (V)	Arus Normal (A)	Arus Start (A)	Daya (W)	Status Sistem
220	1.2	2.8	210	Normal
221	2.4	5.1	430	Normal
220	3.8	7.4	710	Normal
219	6.3	9.8	1350	Trip

Berdasarkan hasil pengujian motor 1 fasa diperoleh bahwa sistem mampu membaca arus *starting* motor yang lebih besar dibanding arus normal tanpa langsung melakukan *trip* selama masih berada dalam batas karakteristik *inverse* yang ditentukan.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Motor 3 Fasa

Tegangan R-S (V)	Tegangan S-T (V)	Tegangan R-T (V)	Arus R (A)	Arus S (A)	Arus T (A)	Daya (W)	Frekuensi (Hz)	Waktu Trip (s)	Status
380	381	379	1.8	1.7	1.8	820	49.9	-	Normal
381	380	380	3.2	3.1	3.2	1450	50.0	-	Normal
379	380	378	5.4	5.3	5.4	2380	49.8	-	Normal
378	379	378	8.7	8.6	8.7	3920	49.7	2.5	Trip

Hasil pengujian motor 3 fasa menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja dengan baik dalam memonitor

parameter kelistrikan dan melakukan proteksi saat terjadi kondisi *overload* pada motor induksi 3 fasa.

C. Pengujian perbandingan karakteristik kurva IEC 60255

Pengujian dilakukan untuk membandingkan karakteristik waktu *trip* antara kurva *standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Waktu Trip Standard Inverse

Arus (A)	PSM	TMS	t _{Teori} (s)	t _{Aktual} (s)	Error (%)
6.5	1.30	0.1	2.86	2.95	3.15
8.2	1.64	0.1	1.52	1.58	3.95
10.5	2.10	0.1	0.95	0.98	3.16
12.0	2.40	0.1	0.76	0.79	3.94
15.0	3.00	0.1	0.58	0.60	3.45
18.0	3.60	0.1	0.47	0.48	2.13

Berdasarkan hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu *trip* aktual mendekati nilai teoritis dengan rata-rata *error* di bawah 5%. Semakin besar arus gangguan maka waktu operasi relay menjadi semakin singkat sesuai karakteristik *standard inverse* IEC 60255.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Waktu Trip Very Inverse

Arus (A)	PSM	TMS	t _{Teori} (s)	t _{Aktual} (s)	Error (%)
6.5	1.30	0.1	4.08	4.20	2.94
8.2	1.64	0.1	2.02	2.10	3.96
10.5	2.10	0.1	1.11	1.15	3.60
12.0	2.40	0.1	0.79	0.82	3.80
15.0	3.00	0.1	0.43	0.45	4.65
18.0	3.60	0.1	0.29	0.30	3.45

Berdasarkan hasil pengujian diperoleh bahwa karakteristik *very inverse* menghasilkan waktu *trip* yang lebih cepat dibanding *standard inverse* pada arus gangguan besar. Waktu *trip* aktual mendekati nilai teoritis dengan *error* rata-rata di bawah 5%.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Waktu Trip Extremely Inverse

Arus (A)	PSM	TMS	t _{Teori} (s)	t _{Aktual} (s)	Error (%)
6.5	1.30	0.1	7.39	7.65	3.52
8.2	1.64	0.1	3.28	3.40	3.66
10.5	2.10	0.1	1.66	1.72	3.61
12.0	2.40	0.1	1.15	1.20	4.35
15.0	3.00	0.1	0.56	0.58	3.57
18.0	3.60	0.1	0.33	0.34	3.03

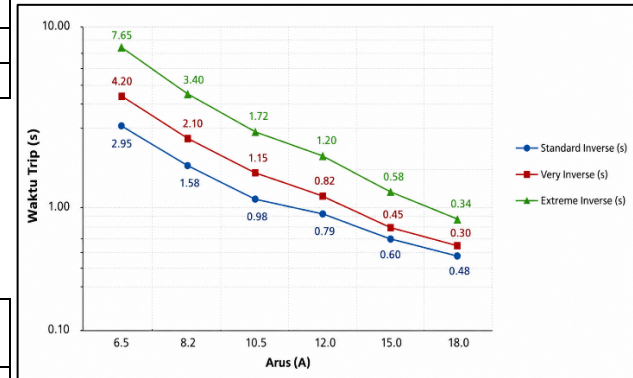
Berdasarkan hasil pengujian diperoleh bahwa karakteristik *extremely inverse* memiliki waktu operasi paling cepat saat arus gangguan semakin besar. Hasil pengujian menunjukkan kesesuaian yang baik antara perhitungan teoritis dan implementasi sistem berbasis ESP32 dengan *error* rata-rata di bawah 5%.

Tabel 4.7 Perbandingan Karakteristik Kurva IEC 60255

Arus (A)	PSM	Standard Inverse (s)	Very Inverse (s)	Extremely Inverse (s)
6.5	1.30	2.95	4.20	7.65
8.2	1.64	1.58	2.10	3.40
10.5	2.10	0.98	1.15	1.72
12.0	2.40	0.79	0.82	1.20
15.0	3.00	0.60	0.45	0.58
18.0	3.60	0.48	0.30	0.34

6.5	1.30	2.95	4.20	7.65
8.2	1.64	1.58	2.10	3.40
10.5	2.10	0.98	1.15	1.72
12.0	2.40	0.79	0.82	1.20
15.0	3.00	0.60	0.45	0.58
18.0	3.60	0.48	0.30	0.34

Berdasarkan Tabel 4.7, karakteristik *standard inverse* menunjukkan respon operasi normal terhadap kenaikan arus gangguan. Karakteristik *very inverse* memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dibanding *standard inverse*, sedangkan karakteristik *extremely inverse* menghasilkan waktu *trip* tercepat pada arus gangguan besar.



Gambar 3.1 Grafik Waktu Trip Terhadap Arus

Dari hasil pengujian terlihat bahwa karakteristik *extremely inverse* memiliki perubahan waktu operasi paling drastis terhadap kenaikan arus gangguan. Semakin besar arus gangguan, relay bekerja semakin cepat.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem proteksi *over current* relay berbasis ESP32 dengan karakteristik inverse sesuai IEC 60255 terintegrasi IoT, dapat disimpulkan bahwa:

1. Sistem proteksi *over current* relay yang dirancang berhasil direalisasikan dan berfungsi dengan baik dalam mendeteksi kondisi arus lebih serta melakukan pemutusan beban secara otomatis pada sistem satu fasa maupun tiga fasa. Integrasi sensor PZEM-004T, mikrokontroler ESP32, dan aktuator relay mampu bekerja secara terkoordinasi dalam satu sistem yang stabil.
2. Implementasi karakteristik kurva inverse sesuai standar IEC 60255, yaitu *standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse*, berhasil diterapkan pada sistem, di mana waktu *trip* relay berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar nilai arus terhadap arus *setting* (PSM), maka waktu *trip* semakin cepat, sesuai dengan teori kurva *inverse*.

3. Tingkat akurasi sistem dalam menentukan waktu *trip* menunjukkan hasil yang cukup baik dengan nilai error yang relatif kecil, sehingga sistem dapat dikatakan mampu mendekati karakteristik teoritis. Perbedaan antara waktu *trip* aktual dan teoritis dipengaruhi oleh faktor delay sistem, respon relay, serta proses pembacaan sensor.
4. Sistem monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan platform Blynk berhasil menampilkan parameter kelistrikan secara *real-time*, meliputi tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya, serta status proteksi (normal/*trip*). Selain itu, fitur notifikasi dan kontrol reset jarak jauh dapat berjalan dengan baik, sehingga meningkatkan kemudahan dalam pemantauan dan pengendalian sistem.
5. Secara keseluruhan, sistem yang dikembangkan dapat menjadi alternatif *over current* relay digital *low-cost* yang memiliki keunggulan dalam fleksibilitas pengaturan kurva proteksi, kemampuan monitoring *real-time*, serta kemudahan integrasi dengan teknologi IoT untuk aplikasi industri skala menengah.

REFERENSI

- [1] A. A. Hameed, A. J. Sultan, M. F. Booneya, and T. A. A. Almuhsen, "Real-Time Implementation of a New Multifunction Relay," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1105, Art. no. 012017, 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1105/1/012017.
- [2] K. Islam, D. Kim, and A. Abu-Siada, "A review on adaptive power system protection schemes for future smart and micro grids, challenges and opportunities," *Electric Power Systems Research*, vol. 230, Art. no. 110241, 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2024.110241.
- [3] Arbain, R. A. Susilo, A. S. Akbar, M. Wahyu, and M. Risky, "Arduino-Based Overcurrent Relay Design with Very Inverse Type," *International Journal of Current Science Research and Review*, vol. 7, no. 11, pp. 8547–8558, Nov. 2024, doi: 10.47191/ijcsrr/V7-i11-41.
- [4] U. S. Ekop, E. E. Okpo, A. T. Umoette, I. S. Etim, and O. I. Jackson, "Application of Intelligent Overcurrent Relays for Real-Time Protection of Induction Motor under Fault Conditions," *Journal of Engineering Research and Reports*, vol. 27, no. 3, pp. 489–510, 2025, doi: 10.9734/jerr/2025/v27i31447.
- [5] R. A. Susilo, M. R. Sidiq, E. N. Hendra, A. H. Kurniawan, and I. A. Riyanto, "Design and Development of Overcurrent Protection Relay Inverse Definite Minimum Time Type Based on Arduino Uno," *International Journal of Current Science Research and Review*, vol. 7, no. 10, pp. 7447–7455, Oct. 2024, doi: 10.47191/ijcsrr/V7-i10-01.
- [6] M. Rojnić, R. Prenc, H. Bulat, and D. Franković, "A Comprehensive Assessment of Fundamental Overcurrent Relay Operation Optimization Function and Its Constraints," *Energies*, vol. 15, no. 4, Art. no. 1271, 2022, doi: 10.3390/en15041271.
- [7] P. R. Lopes and R. Bertho Junior, "Development of a low-cost relay prototype for real-time power protection functions," *Learning and Nonlinear Models – Journal of the Brazilian Society on Computational Intelligence*, vol. 21, no. 1, pp. 90–109, 2023.
- [8] Y.-Y. Hong, C.-W. Yu, Y.-D. Lee, J.-L. Jiang, and S.-S. Wang, "Coordination of protective relays in distribution systems considering uncertainty caused by renewables and demands based on orthogonal experiments," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 36, Art. no. 101206, 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101206.
- [9] Sunarto, T. Tohir, Y. P. Hikmat, and Sudrajat, "Rancang bangun alat pengujian karakteristik MCB tipe B2, C2, dan D2," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 10, no. 2, pp. 87–94, Dec. 2025, doi: 10.31544/jtera.v10.i2.2025.87-94.
- [10] A. Hasibuan, M. Hafidzuddin, M. Jannah, D. R. Jintaka, and G. S. Kerimzade, "Development of 220V Overcurrent Relay Protection System Based on Internet of Things," *Andalas Journal of Electrical and Electronic Engineering Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 17–22, May 2025, doi: 10.25077/ajeet.v5i1.40.
- [11] S. Lavanya, S. Prabakaran, and N. Ashok Kumar, "Behavioral Dynamics of High Impedance Fault Under Different Line Parameters," *International Journal of Electrical and Electronics Research*, vol. 10, no. 2, pp. 370–374, 2022, doi: 10.37391/IJEER.100251.
- [12] Muliadi, M. M. Bahar, A. Sabril, and M. Riska, "Internet of Things (IoT)-based Overcurrent Protection and Detection Device for Household Electrical Safety," *Journal of Embedded System Security and Intelligent Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 754–766, 2025, doi: 10.59562/jessi.v6i4.11715.
- [13] T. D. Hendrawati, F. A. Wicaksana, I. Kumaran, and M. D. Abdillah, "Sistem Peringatan Dini Banjir Berbasis Internet of Things (IoT) dengan Integrasi Multi-Sensor dan Logika Fuzzy," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 10, no. 2, pp. 131–140, Dec. 2025, doi: 10.31544/jtera.v10.i2.2025.131-140.
- [14] D. Hercog, T. Lerher, M. Truntič, and O. Težak, "Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices," *Sensors*, vol. 23, no. 15, Art. no. 6739, 2023, doi: 10.3390/s23156739.
- [15] T. D. Hendrawati, F. A. Wicaksana, I. Kumaran, and M. D. Abdillah, "Sistem Peringatan Dini Banjir Berbasis Internet of Things (IoT) dengan Integrasi Multi-Sensor dan Logika Fuzzy," *JTERA (Jurnal Teknologi Rekayasa)*, vol. 10, no. 2, pp. 131–140, Dec. 2025, doi: 10.31544/jtera.v10.i2.2025.131-140.
- [16] D. P. Karismawati, M. A. Ghaniy, R. Kamillah, A. Suhendi, and C. Saputra, "Monitoring and control of IoT-based building electrical load limit," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2673, Art. no. 012022, 2023, doi: 10.1088/1742-6596/2673/1/012022.

- [17] R. Tiwari, R. K. Singh, and N. K. Choudhary, "Coordination of dual setting overcurrent relays in microgrid with optimally determined relay characteristics for dual operating modes," *Protection and Control of Modern Power Systems*, vol. 7, no. 1, Art. no. 6, 2022, doi: 10.1186/s41601-022-00226-1.
- [18] B. R. P. D. Palevi, C. D. Megawati, E. Nurcahyo, T. Hidayat, R. Setiawan, and K. A. Latif, "Kelayakan dan Performa Relai Arus Berlebih Berbasis Mikroprosesor dan Fuzzy Logic dalam Sistem Perlindungan Tenaga Listrik," *Jurnal Bumigora Information Technology (BITE)*, vol. 6, no. 1, pp. 71–80, Jun. 2024, doi: 10.30812/bite.v6i1.4101.
- [19] ABB, *Distribution Automation Handbook: Power System Protection, Section 8.2 Relay Coordination*, 1MRS757285. ABB, 2010.
- [20] S. D. Godwal, K. S. Pandya, S. C. Vora, C. R. Mehta, and V. R. Rajput, "Optimal overcurrent relay coordination for interconnected power systems: A proper approach and improved technique," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 5, Art. no. 100248, 2023, doi: 10.1016/j.prime.2023.100248.
- [21] S. Tamilselvi, S. Ragul, V. Rajini, and K. N. Dinesh Babu, "Hybrid transformer overload protection scheme integrating real-time thermal imaging and numerical relay coordination," *Electric Power Systems Research*, vol. 251, Art. no. 112188, 2026, doi: 10.1016/j.epsr.2025.112188.
- [22] H. J. El-Khozondar, S. Y. Mtair, K. O. Qoffa, O. I. Qasem, A. H. Munyarawi, Y. F. Nassar, E. H. E. Bayoumi, and A. Abd El Baset Abd El Halim, "A smart energy monitoring system using ESP32 microcontroller," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 9, Art. no. 100666, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100666.
- [23] A. P. Muksin and B. Tjahjono, "IoT-Based Remote Electricity Control and Management Monitoring System Using Blynk Application," *Global Insights in Management and Economic Research*, vol. 1, no. 02, pp. 65–70, 2025, doi: 10.53905/Gimer.v1i02.11.
- [24] A. Reda, A. F. Abdelgawad, M. I. Elsayed, and F. B. Al-Dousar, "Multi-characteristic overcurrent relay of feeder protection for minimum tripping times and self-protection," *Electrical Engineering*, vol. 105, pp. 605–617, 2023, doi: 10.1007/s00202-022-01683-5.
- [25] J. L. Santos, R. C. Miguel, A. I. Mendoza, and J. A. Garcia, "Coordinated overcurrent relay development with Arduino and ACS712," *Journal of Engineering, Technology, and Applied Science*, vol. 5, no. 3, pp. 113–120, 2023.
- [26] R. A. S. Arbain, A. S. Akbar, M. Wahyu, and M. Risky, "Arduino-based overcurrent relay design with very inverse type," *International Journal of Current Science Research and Review*, vol. 7, no. 11, pp. 8547–8558, Nov. 2024.
- [27] A. S. J. Wardhana, E. S. Damarwan, M. A. A. Bachrun, and M. L. Hakim, "Comparison of over current relay characteristics in electric power protection systems: A comparison of theory and practice," *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 18, no. 2, pp. 172–177, 2025, doi: 10.25103/jestr.182.21.
- [28] A. Reda, A. F. Abdelgawad, and M. Ibrahim, "Effect of non standard characteristics of overcurrent relay on protection coordination and maximizing overcurrent protection level in distribution network," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 9, pp. 6851–6867, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2021.12.034.
- [29] P. H. C. Ali, L. F. Widayanto, M. Pakorong, F. C. Bagaskara, R. A. Susilo, and P. Murdiyati, "Rancang bangun simulator overcurrent relay type standard inverse dan constant time berbasis Arduino," *PoliGrid*, vol. 6, no. 1, 2025.
- [30] S. Rashaie and A. Yazdaninejadi, "An improved dynamic model for overcurrent relays in protection of electrical networks: Addressing two-level fault currents," *Electric Power Systems Research*, vol. 246, Art. no. 111713, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.epsr.2025.111713.
- [31] TestGuy, "Inverse Time Overcurrent Relays and Curves Explained," *TestGuy Electrical Testing Network*, Jul. 29, 2021. Accessed: May 2, 2026. [Online]. Available: [<https://testguy.net/content/370-Inverse-Time-Overcurrent-Relays-and-Curves-Explained>]