
Academia Open



By Universitas Muhammadiyah Sidoarjo

Table Of Contents

Journal Cover	1
Author[s] Statement	3
Editorial Team	4
Article information	5
Check this article update (crossmark)	5
Check this article impact	5
Cite this article.....	5
Title page	6
Article Title	6
Author information	6
Abstract	6
Article content	8

Originality Statement

The author[s] declare that this article is their own work and to the best of their knowledge it contains no materials previously published or written by another person, or substantial proportions of material which have been accepted for the published of any other published materials, except where due acknowledgement is made in the article. Any contribution made to the research by others, with whom author[s] have work, is explicitly acknowledged in the article.

Conflict of Interest Statement

The author[s] declare that this article was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

Copyright Statement

Copyright © Author(s). This article is published under the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) licence. Anyone may reproduce, distribute, translate and create derivative works of this article (for both commercial and non-commercial purposes), subject to full attribution to the original publication and authors. The full terms of this licence may be seen at <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode>

Academia Open

Vol. 11 No. 1 (2026): June
DOI: 10.21070/acopen.11.2026.14715

EDITORIAL TEAM

Editor in Chief

Mochammad Tanzil Multazam, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Managing Editor

Bobur Sobirov, Samarkand Institute of Economics and Service, Uzbekistan

Editors

Fika Megawati, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Mahardika Darmawan Kusuma Wardana, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Wiwit Wahyu Wijayanti, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Farkhod Abdurakhmonov, Silk Road International Tourism University, Uzbekistan

Dr. Hindarto, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Evi Rinata, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

M Faisal Amir, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Dr. Hana Catur Wahyuni, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Complete list of editorial team ([link](#))

Complete list of indexing services for this journal ([link](#))

How to submit to this journal ([link](#))

Academia Open

Vol. 11 No. 1 (2026): June
DOI: 10.21070/acopen.11.2026.14715

Article information

Check this article update (crossmark)



Check this article impact (*)



Save this article to Mendeley



(*) Time for indexing process is various, depends on indexing database platform

Fast Fault Detection In ESP32 Overcurrent Protection Networks Via Dual Inverse Curves: Deteksi Gangguan Cepat Pada Jaringan Proteksi Arus Lebih ESP32 Melalui Kurva Ganda

Prasetyo Wahyudi Hardyanto, prasetyo.wahyudi.2205366@students.um.ac.id

Program Studi S1 Teknik Elektro, Universitas Negeri Malang, Indonesia

Sujito Sujito, sujito.ft@um.ac.id (*)

Program Studi S1 Teknik Elektro, Universitas Negeri Malang, Indonesia

Syahrul Zain Firmansyah, syahrul.zain.2205366@students.um.ac.id

Program Studi S1 Teknik Elektro, Universitas Negeri Malang, Indonesia

Muh. Fahri Fathurrahman, muhfahri.fathurrahman.2205366@students.um.ac.id

Program Studi S1 Teknik Elektro, Universitas Negeri Malang, Indonesia

(*) Corresponding author

Abstract

General Background Overcurrent safety mechanisms maintain power grid reliability and prevent equipment damage from electrical short circuits and overloads. **Specific Background** Digital relays based on modern microcontrollers provide precise time-current behaviors necessary for proper distribution system coordination. **Knowledge Gap** Existing digital setups frequently lack integrated remote observation capabilities combined with rapid processing architecture. **Aims** This study designs an ESP32-based safety framework utilizing two specific inverse time formulas for real-time monitoring. **Results** Testing with overload inputs between 1.40 A and 2.95 A at a 0.6 A pickup showed accurate isolation without false triggering during normal conditions. The moderate curve yielded disconnection times ranging from 1.31 to 6.08 seconds, whereas the extreme curve provided significantly faster responses ranging from 0.10 to 1.08 seconds. **Novelty** The architecture successfully merges an ESP32 processing unit, a PZEM-004T sensor, and a logic shifter to closely replicate industrial IEC 60255 standards while simultaneously enabling continuous Internet of Things telemetry. **Implications** This responsive digital configuration offers an economical and stable solution for modern electrical grids and serves as a highly effective educational simulation tool.

Highlights

- ♦ The engineered micro-controller accurately identifies excessive electrical loads without inappropriate triggering during normal capacity operations.
- ♦ Disconnection speeds strictly adhere to IEC 60255 norms, demonstrating accelerated responses during high-magnitude anomalies.
- ♦ Internet of Things integration enables continuous remote observation of operational status and measurable parameters.

Keywords

Power System Security; Internet Of Things; Digital Relay; Response Time; Remote Observation

Academia Open

Vol. 11 No. 1 (2026): June
DOI: 10.21070/acopen.11.2026.14715

Published date: 2026-06-22

PENDAHULUAN

Proteksi arus lebih merupakan komponen penting dalam menjaga keandalan sistem tenaga listrik karena gangguan seperti hubung singkat dan beban lebih dapat menyebabkan kerusakan peralatan serta pemadaman berskala luas. Overcurrent Relay (OCR) dirancang untuk mendeteksi arus berlebih dan memutuskan jaringan sesuai karakteristik waktu-arus tertentu yang umumnya mengikuti kurva Standard Inverse, Very Inverse, hingga Extremely Inverse [1]. Karakteristik inverse ini memberikan waktu pemutusan yang semakin cepat seiring meningkatnya arus gangguan sehingga lebih sesuai untuk koordinasi proteksi dalam sistem distribusi. Kebutuhan akan relay yang presisi dan adaptif ini mendorong banyak penelitian dalam pengembangan OCR digital berbasis mikrokontroler [2].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa mikrokontroler mampu meniru karakteristik kerja relay industri dengan akurasi yang memadai. Frandhiyawan, Winarno, dan Rahmatullah (2018) merancang rele arus lebih berbasis Arduino dan IoT, yang mampu melakukan monitoring arus secara real-time melalui jaringan internet, membuktikan bahwa teknologi IoT meningkatkan kapabilitas pemantauan sistem proteksi [3]. Cahayahati dan Zoni (2017) juga mengembangkan OCR berbasis ATmega 8535 dengan kurva inverse, yang hasilnya menunjukkan bahwa mikrokontroler mampu mengimplementasikan karakteristik inverse secara stabil dan sesuai teori proteksi. Penelitian-penelitian tersebut mengonfirmasi bahwa mikrokontroler dapat menjadi alternatif ekonomis dan fleksibel bagi sistem proteksi digital [4].

Studi berikutnya memperkuat arah pengembangan OCR digital. Aulia dkk. (2023) merancang Arduino-based inverse overcurrent relay dengan berbagai jenis kurva inverse dan menunjukkan bahwa perangkat digital mampu menghasilkan waktu trip yang presisi terhadap arus gangguan. Wijaya, Ihsandi, Nainggolan, dan Murdiyat (2020) menambahkan bahwa pengaturan Time Multiplier Setting (TMS) dalam relay berbasis Arduino memberikan fleksibilitas dalam setting proteksi layaknya relay komersial [5]. Selain itu, penelitian oleh Ali dkk. (2021) tentang simulator kurva Standard Inverse dan Constant Time membuktikan bahwa mikrokontroler mampu mensimulasikan perilaku relay industri dengan baik untuk kebutuhan penelitian maupun pembelajaran [6].

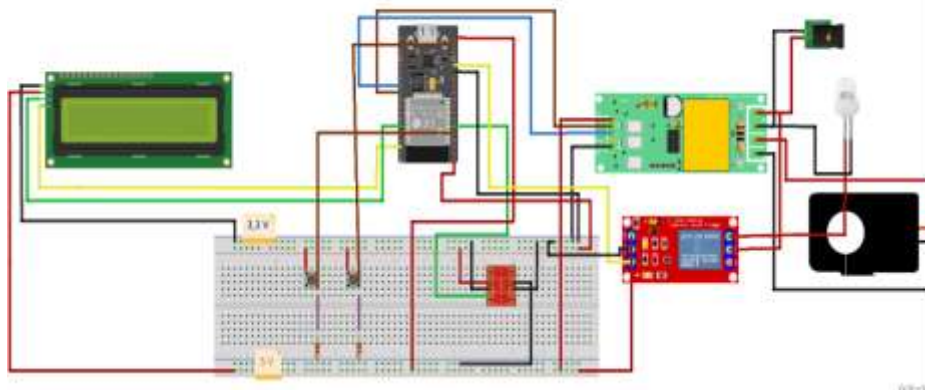
Walaupun banyak penelitian menggunakan Arduino, platform tersebut memiliki keterbatasan pada kecepatan pemrosesan, stabilitas komunikasi nirkabel, dan integrasi sistem monitoring berskala besar. Pengembangan teknologi mikrokontroler modern seperti ESP32, yang memiliki prosesor lebih cepat dan konektivitas Wi-Fi/Bluetooth bawaan, membuka peluang untuk mengembangkan OCR digital yang lebih responsif dan terintegrasi [7]. Oleh karena itu, penelitian berjudul "Monitoring Overcurrent Relay dengan Karakteristik Standard Inverse dan Extremely Inverse Berbasis ESP32" menjadi penting untuk menghasilkan sistem proteksi yang tidak hanya presisi dalam mengikuti kurva proteksi standar, tetapi juga mampu menyediakan monitoring real-time yang lebih akurat dan efisien bagi sistem tenaga listrik modern [8].

METODE

A. Desain Alat Dengan Aplikasi

Rangkaian ini dirancang menggunakan aplikasi Fritzing dengan alat dan komponen yang digunakan diantaranya :

1. Mikrokontroler (ESP-32S)
2. Sensor PZEM-004T
3. Relay modul 5 V
4. LCD 16x2 I2C
5. Logic Shifter 3,3 V/5 V
6. Kabel Jumper
7. Baterai



Gambar 1 Desain Rangkaian

B. Pembuatan Program

Pemrograman sistem dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa pemrograman C/C++. Program dirancang untuk membaca data arus dari sensor PZEM-004T, kemudian memproses data tersebut berdasarkan algoritma karakteristik Standard Inverse dan Extremely Inverse. Nilai arus yang terbaca dibandingkan dengan nilai setting arus (pickup current) untuk menentukan kondisi normal atau gangguan.

Apabila arus terukur melebihi nilai setting, ESP32 akan menghitung waktu trip berdasarkan persamaan kurva inverse yang digunakan. Setelah waktu trip terpenuhi, ESP32 memberikan sinyal ke modul relay untuk memutus beban. Selain itu, data arus, status relay, dan kondisi trip dikirimkan secara real-time ke aplikasi Blynk melalui koneksi Wi-Fi sebagai media monitoring jarak jauh [9].

```
1 #define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL08Y1v0UV5"  
2 #define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Tes"  
3 #define BLYNK_AUTH_TOKEN "jw8hx-rse8itf0rqsu0vpi-F7CLkDa0xc"  
4 #define BLYNK_PRINT Serial  
5  
6 #include <PZEM004Tv30.h>  
7 #include <liquidCrystal_I2C.h>  
8 #include <WiFi.h>  
9 #include <WiFiClient.h>  
10 #include <BlynkSimpleEsp32.h>  
11 #include <ESP32Pin.h>  
12 #include <WiFiManager.h>  
13  
14 // ----- SENSOR -----  
15 PZEM004Tv30 pzem(Serial2, 16, 17);  
16  
17 // ----- LCD -----  
18 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);  
19  
20 // ----- RELAY -----  
21 int relayPin = 13;  
22 float Ipickup = 0.6;  
23 // Time Multiplicar Setting (disesuaikan arus max 3A)  
24 float TMS_ST = 0.15;  
25 float TMS_FL = 0.03;  
26 // ----- BUTTON -----  
27 int buttonNodePin = 5;  
28 int buttonNodeState = 0;  
29 int lastButtonNodeState = 0;  
30  
31 int buttonTripPin = 10;  
32 int buttonTripState = 0;
```

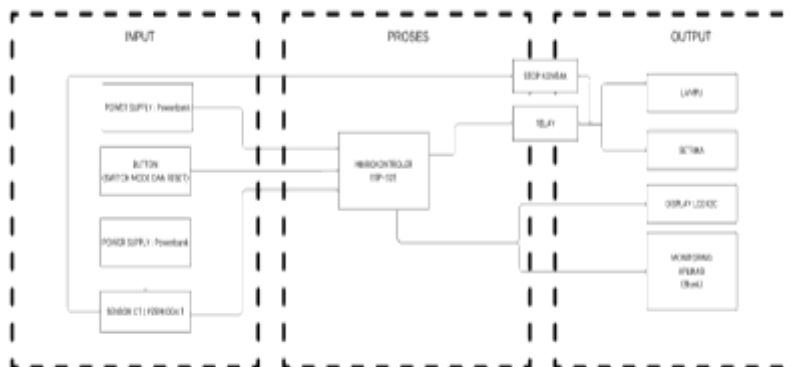
Gambar 2 Program Sistem

C. Diagram Blok

Gambar 2 merupakan ilustrasi diagram perancangan yang digunakan pada sistem ini. Diagram ini terdiri dari 3 bagian utama yaitu perancangan input, proses dan output.

Diagram perancangan sistem dibuat untuk mempermudah perancangan prototype dan mengetahui alur sistem secara sederhana. Pada bagian input ini terdapat 4 komponen yaitu, power supply dari powerbank, power supply dari PLN, Button untuk memulai sistem, dan modul sensor PZEM-004T 100 A.

Pada bagian proses terdapat modul NodeMCU ESP32S sebagai perangkat yang memproses input dan meneruskan ke bagian output. Pada bagian output terdapat 4 komponen yaitu, lampu, setrika, LCD display I2C, dan aplikasi blynk.



Gambar 3 Diagram Blok Sistem

Academia Open

Vol. 11 No. 1 (2026): June
DOI: 10.21070/acopen.11.2026.14715

Cara Kerja

1. Push Button

Menentukan jenis / tipe yang akan diuji dengan menekan tombol/ push button.

2. Sensor PZEM-004T membaca arus pada beban

PZEM-004T mengukur arus yang mengalir pada rangkaian beban secara real-time dan menghasilkan data pengukuran digital.

3. Mengirim data ke ESP32S

Hasil pembacaan arus (dan tegangan) dari PZEM-004T dikirim ke mikrokontroler ESP32S melalui komunikasi serial.

4. Logic shifter mengubah tegangan 3.3 V → 5 V

Karena output kontrol ESP32S hanya 3.3 V, logic shifter menaikkan level tegangan menjadi 5 V agar sesuai dengan kebutuhan input coil relay.

5. Relay menerima perintah dari ESP32S

Berdasarkan logika proteksi (misalnya arus melebihi setting), ESP32S memberikan sinyal ke relay untuk trip atau on/off, sehingga rangkaian beban dapat diputus.

6. LCD menampilkan data real-time

Layar LCD menampilkan informasi penting seperti arus, tegangan, status trip, serta kondisi relay sehingga dapat memantau sistem secara langsung.

7. Monitoring

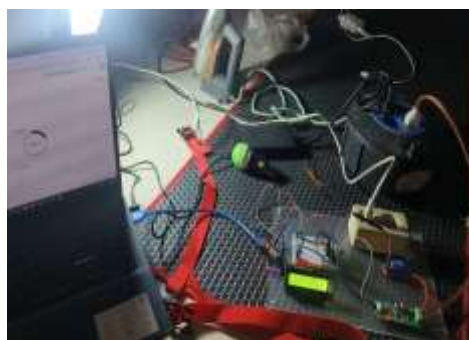
Monitoring secara real-time dapat diakses melalui aplikasi yang sudah terhubung pada perangkat melalui wifi

8. Push Button Reset

Melakukan reset dengan menekan tombol button, untuk mereset atau mengembalikan sistem menjadi kondisi normal [10].

D. Pembuatan

Tahap pembuatan alat merupakan proses perwujudan rancangan sistem monitoring overcurrent relay berbasis ESP32 yang telah dirancang pada tahap desain. Proses ini meliputi perakitan perangkat keras (hardware), pemrograman perangkat lunak (software), serta integrasi sistem monitoring berbasis aplikasi. Tujuan utama dari tahap ini adalah memastikan setiap komponen dapat bekerja sesuai fungsi dan saling terintegrasi dalam satu sistem proteksi arus lebih yang utuh.



Gambar 4 Perancangan Alat

Perangkat keras dirakit dengan menghubungkan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat kendali sistem dengan sensor arus PZEM-004T, modul relay 5 V sebagai pemutus beban, LCD 16×2 I2C sebagai media tampilan lokal, logic shifter sebagai penyesuai level tegangan, serta push button sebagai pengatur mode dan reset sistem. Seluruh komponen dihubungkan menggunakan kabel jumper dan diberi catu daya yang sesuai baik dari sumber PLN maupun powerbank sebagai suplai ESP32. Berikut adalah tabel wiring alat untuk mempermudah merangkai :

1. Wiring ESP 32 - PZEM 004T

ESP 32	SENSOR PZEM 004T
5 V	VCC (5 V)
GND	GND

[ISSN 2714-7444 \(online\)](https://doi.org/10.21070/acopen.11.2026.14715), <https://acopen.umsida.ac.id>, published by [Universitas Muhammadiyah Sidoarjo](https://www.umsida.ac.id)

Copyright © Author(s). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY).

RX2 = GPIO16	TX
TX2 = GPIO17	RX

2. Wiring ESP 32 - LCD I2C 16x2

ESP 32	LCD I2C
5 V	VCC
GND	GND
GPIO21	SDA
GPIO22	SCL

3. Wiring ESP 32 - RELAY 5 V

ESP 32	RELAY 5 V
5 V	VCC
GND	GND
GPIO13	IN

4. Wiring ESP 32 – Push Button

ESP 32	PUSH BUTTON
PUSH BUTTON SWITCH MODE	
3,3 V	PIN KIRI
PIN 5	PIN KANAN
PUSH BUTTON RESET	
PIN 3,3 V	PIN KIRI
PIN 18	PIN KANAN

Perakitan perangkat keras dilakukan sesuai dengan diagram blok dan wiring yang telah dirancang. Sensor PZEM-004T dihubungkan ke ESP32 melalui komunikasi serial UART, dengan pin RX dan TX masing-masing terhubung ke GPIO16 dan GPIO17. Sensor ini berfungsi membaca arus dan tegangan beban secara real-time menggunakan CT eksternal dengan kapasitas hingga 100 A.

LCD 16×2 I2C dihubungkan ke ESP32 menggunakan jalur komunikasi I2C, yaitu pin SDA pada GPIO21 dan SCL pada GPIO22. LCD digunakan untuk menampilkan nilai arus, tegangan, status relay, serta kondisi trip sistem. Modul relay 5 V dihubungkan ke GPIO13 ESP32 melalui logic shifter untuk menyesuaikan level tegangan kontrol dari 3,3 V menjadi 5 V agar relay dapat bekerja dengan stabil.

Push button digunakan sebagai input manual untuk memilih jenis karakteristik kurva proteksi (Standard Inverse atau Extremely Inverse) serta untuk melakukan reset sistem setelah terjadi trip. Dengan konfigurasi ini, sistem mampu bekerja secara otomatis sekaligus memberikan kontrol manual kepada pengguna [11].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa setiap blok penyusun sistem serta keseluruhan sistem Overcurrent Relay (OCR) berbasis ESP32 dapat bekerja sesuai dengan perancangan dan teori proteksi arus lebih. Pengujian difokuskan pada akurasi pembacaan arus, respon waktu trip berdasarkan karakteristik Standard Inverse dan Extremely Inverse, keandalan modul relay sebagai pemutus beban, serta kemampuan sistem dalam melakukan monitoring secara real-time melalui aplikasi berbasis internet.

A. Uji Blok

Pengujian blok bertujuan untuk mengetahui kinerja masing-masing bagian sistem secara terpisah sebelum diintegrasikan menjadi satu kesatuan sistem proteksi.

1. Uji Blok ESP 32

Parameter	Nilai alat Ukur	Nilai Hasil ESP 32	Selisih	Error (%)
Tegangan 3,3 V	3,3 V	3,27 V	0,03	0,91 %
Arus pada 3,3 V	3,3 mA	3,25 mA	0,05	1,52 %
Tegangan 5 V	5 V	4,95 V	0,05	1 %
Arus pada 5 V	4,65 mA	4,6 mA	0,05	1,08 %

Jika menggunakan Sumber dari laptop atau kabel charger hp tegangan yang bisa diperoleh ESP32S hanya 3,3 V dan maksimal di 4,67 V tidak bisa mencapai 5 V. Jika menggunakan adaptor 9 V maka ESP32S mendapatkan tegangan sebesar 5,2 V.

2. Uji Blok Sensor PZEM 004T

Batasan Pengukuran	Arus terukur
Minimal arus terukur	0,01 A

Maksimal arus terukur	100 A
-----------------------	-------

Pengujian sensor arus dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan arus dari sensor PZEM004T dengan alat ukur standar berupa amperemeter. Beban divariasikan sehingga menghasilkan arus mulai dari kondisi normal hingga mendekati arus pickup yang telah ditetapkan sebesar 0,01 A. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor mampu membaca arus dengan tingkat deviasi yang relatif kecil dan masih berada dalam batas toleransi pengukuran, sehingga layak digunakan sebagai input sistem proteksi arus lebih.

3. Uji Blok Relay Modul 5 V Active Low

Pada rangkaian komponen ini menggunakan relay 5 V berfungsi sebagai kontrol tegangan saat NO (Normally Open) dan NC (Normally Close) saat terjadi gangguan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kondisi relay.

Parameter	Nilai Alat Ukur	Nilai Terbaca	Selisih	Error (%)
Tegangan	4,65 V	4,60 V	0,05	1%
Arus	0,92 mA	0,90 mA	0,02	2,17%

4. Uji Blok Logic Shifter

Pengujian logic shifter dilakukan untuk memastikan kesesuaian level tegangan logika antara mikrokontroler ESP32 yang beroperasi pada level tegangan 3,3 V dengan modul relay yang bekerja pada level kontrol 5 V serta memiliki karakteristik active low. Pada relay jenis ini, kondisi logika LOW pada pin input akan mengaktifkan relay, sedangkan kondisi logika HIGH akan menonaktifkan relay. Perbedaan level tegangan dan karakteristik logika tersebut menjadikan penggunaan logic shifter sebagai komponen penting untuk menjamin keandalan sistem.

Metode pengujian dilakukan dengan memberikan sinyal logika HIGH dan LOW dari ESP32 ke input logic shifter, kemudian mengukur tegangan keluaran logic shifter yang terhubung ke pin input relay. Saat ESP32 mengeluarkan logika HIGH ($\approx 3,3$ V), logic shifter menerjemahkannya menjadi logika HIGH (≈ 5 V) pada sisi keluaran, sehingga relay berada pada kondisi tidak aktif (OFF). Sebaliknya, ketika ESP32 mengeluarkan logika LOW (≈ 0 V), logic shifter menghasilkan tegangan keluaran mendekati 0 V yang menyebabkan relay berada pada kondisi aktif (ON) dan memutus atau menghubungkan beban sesuai konfigurasi kontak relay [12].

Kondisi Logika	Parameter	Nilai Alat Ukur	Nilai Terbaca	Kondisi Relay
HIGH	Tegangan	4,65 V	4,60 V	OFF
HIGH	Arus	4,65 mA	4,60 mA	OFF
LOW	Tegangan	3,3 V	3,28 V	ON
LOW	Arus	3,3 mA	3,25 mA	ON

Pengujian lanjutan dilakukan dengan mengintegrasikan logic shifter ke dalam sistem proteksi arus lebih. Pada saat sistem mendeteksi arus gangguan dan status trip aktif, ESP32 memberikan sinyal LOW ke logic shifter sehingga relay aktif dan rangkaian beban terputus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa logic shifter mampu meneruskan sinyal kontrol secara konsisten tanpa kesalahan logika, serta tidak mempengaruhi waktu respon relay secara signifikan.

5. Uji Blok LCD dan Monitoring Blynk

Pengujian LCD I2C dilakukan dengan menampilkan informasi arus, tegangan, status trip, serta jenis kurva yang aktif. Seluruh informasi dapat ditampilkan dengan jelas dan diperbarui secara periodik. Sementara itu, pengujian monitoring melalui aplikasi Blynk menunjukkan bahwa data arus, tegangan, dan status proteksi dapat dipantau secara real-time melalui smartphone, sehingga mendukung fungsi monitoring jarak jauh pada sistem proteksi.

Parameter	Nilai dari ESP	Tampilan LCD	Tampilan Blynk
Tegangan	211 V	211 V	210 V
Arus	0,60 A	0,60 A	0,58 A

6. Uji Blok Push Button

Setelah terjadi trip, sistem diuji dengan melakukan reset menggunakan tombol reset manual. Ketika tombol ditekan, status trip dihapus dan ESP32 kembali mengirimkan sinyal logika HIGH ke logic shifter, sehingga relay active low kembali ke kondisi tidak aktif dan rangkaian beban dapat terhubung kembali. Selama proses pengujian, status arus, tegangan, jenis kurva, serta kondisi trip dapat dipantau secara real-time melalui LCD dan aplikasi monitoring berbasis internet. Hal ini menunjukkan bahwa sistem monitoring tidak mengganggu fungsi utama proteksi.

Jenis Push Button	Kondisi Awal	Aksi Tombol	Respon	Kesesuaian
Mode	Kurva SI	Tombol ditekan 1x	Kurva berubah menjadi EI	Sesuai

	Kurva EI	Tombol ditekan 1x	Kurva berubah menjadi SI	Sesuai
Trip/Reset	Sistem normal	Tombol ditekan 1x	Tidak ada perubahan	Sesuai
	Sistem trip	Tombol ditekan 1x	Status trip direset	Sesuai
	Sistem Trip	Tombol tidak ditekan	Sistem tetap trip	Sesuai

B. Uji Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kinerja keseluruhan sistem monitoring dan proteksi arus lebih berbasis ESP32 setelah seluruh blok penyusun sistem terintegrasi secara penuh. Sistem yang diuji meliputi sensor arus PZEM-004T, mikrokontroler ESP32, logic shifter 3,3 V-5 V, modul relay 5 V active-low sebagai pemutus beban, LCD I2C, serta sistem monitoring berbasis internet. Tujuan pengujian ini adalah memastikan sistem mampu mendeteksi arus lebih, menghitung waktu trip sesuai karakteristik Standard Inverse dan Extremely Inverse. Berikut pengujian yang telah dilakukan :

Tabel Uji 1 Sistem Dengan TMS (0,15 dan 0,03)

NO	Jenis Beban	Daya	Arus Terukur	M = I/Iset	Kurva	TMS	Waktu Trip	Relay
1	1 Lampu	1	0,04 A	0,0075	SI	0,15	-	Tertutup
2	1 Lampu	1	0,04 A	0,0075	EI	0,03	-	Tertutup
3	Setrika 1 (350 W) + Setrika 2 (300 W)	650	2,95 A	4,92	SI	0,15	0,86	Terbuka
4	Setrika 1 + Setrika 2	650	2,95 A	4,92	EI	0,03	0,10	Terbuka
5	Setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W)	359	1,63 A	2,72	SI	0,15	1,93	Terbuka
6	Setrika 1 + Lampu	359	1,63 A	2,72	EI	0,03	0,48	Terbuka
7	Setrika 2 + Lampu	309	1,40 A	2,33	SI	0,15	3,65	Terbuka
8	Setrika 2 + Lampu	309	1,40 A	2,33	EI	0,03	0,67	Terbuka

Tabel Uji 2 Sistem Dengan TMS (0,25 dan 0,06)

NO	Jenis Beban	Daya	Arus Terukur	M = I/Iset	Kurva	TMS	Waktu Trip	Relay
1	1 Lampu	1	0,04 A	0,0075	SI	0,25	-	Tertutup
2	1 Lampu	1	0,04 A	0,0075	EI	0,06	-	Tertutup
3	Setrika 1 (350 W) + Setrika 2 (300 W)	650	2,95 A	4,92	SI	0,25	1,43	Terbuka
4	Setrika 1 + Setrika 2	650	2,95 A	4,92	EI	0,06	0,21	Terbuka
5	Setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W)	359	1,63 A	2,72	SI	0,25	3,22	Terbuka
6	Setrika 1 + Lampu 9 watt	359	1,63 A	2,72	EI	0,06	0,95	Terbuka
7	Setrika 2 + Lampu	309	1,40	2,33	SI	0,25	4,08	Terbuka
8	Setrika 2 + Lampu	309	1,40	2,33	EI	0,06	1,26	Terbuka

Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kinerja Overcurrent Relay (OCR) dengan karakteristik Standard Inverse (SI) dan Extremely Inverse (EI) berdasarkan standar IEC 60255. Sistem diuji pada beberapa kombinasi beban untuk melihat pengaruh besar arus, multiple of pickup (M), serta nilai Time Multiplier Setting (TMS) terhadap waktu trip dan status relay. Selain itu, sistem juga tidak mengalami false trip, data arus dan tegangan tampil stabil pada LCD, serta nilai pengukuran dapat dipantau secara real-time melalui aplikasi monitoring [13].

Parameter tetap pada seluruh pengujian:

1. Tegangan sistem : 220 V
 2. Arus pickup (Iset) : 0,6 A
 3. Arus maksimum sistem : 3 A
 4. Kurva inverse : SI dan EI
- a. Analisis Tabel Uji 1 Sistem dengan TMS (0,15 dan 0,03)

Pada tabel pertama, digunakan:

TMS SI = 0,15

TMS EI = 0,03

- 1) Beban Kecil (Lampu 1 W)

Baris 1 dan 2 menunjukkan pengujian dengan beban lampu 1 W yang menghasilkan arus 0,04 A dengan nilai M = 0,0075. Karena nilai M jauh lebih kecil dari 1, maka arus tidak mencapai pickup. Akibatnya, baik pada kurva SI maupun EI, relay tidak bekerja (tertutup) dan tidak terjadi trip. Hal ini membuktikan bahwa sistem proteksi tidak sensitif terhadap beban normal atau sangat kecil, sehingga aman dari nuisance trip.

- 2) Beban Besar (Setrika 1 + Setrika 2)

Pada baris 3 dan 4, kombinasi dua setrika menghasilkan arus 2,95 A dengan nilai M = 4,92. Nilai ini jauh melebihi arus pickup, sehingga OCR masuk ke daerah kerja. Pada kondisi ini :

- a) Kurva SI dan EI sama-sama menghasilkan trip (relay terbuka).
- b) Waktu trip tercatat ON, menunjukkan bahwa relay bekerja sesuai karakteristik inverse.
- c) Kurva EI secara teori memiliki waktu trip lebih cepat dibanding SI karena TMS lebih kecil.

- 3) Beban Menengah (Setrika + Lampu 9 W)

Baris 5–8 menunjukkan kombinasi beban menengah dengan arus antara 1,40–1,63 A dan nilai M antara 2,33–2,72. Pada kondisi ini:

- a) Arus telah melewati pickup.
- b) Relay bekerja baik pada kurva SI maupun EI.
- c) Semua kondisi menghasilkan trip, menunjukkan bahwa OCR responsif terhadap gangguan arus lebih pada level menengah.

Kesimpulan TMS 0,15 dan 0,03 : Setelan TMS kecil menyebabkan waktu trip relatif cepat, terutama pada kurva EI, sehingga cocok untuk sistem yang memerlukan respon proteksi cepat terhadap arus lebih.

- b. Analisis Tabel Uji 2 Sistem dengan TMS (0,25 dan 0,06)

Pada tabel kedua, digunakan:

TMS SI = 0,25

TMS EI = 0,06

Secara umum, kombinasi beban dan nilai arus terukur sama dengan tabel pertama. Perbedaan utama terletak pada nilai TMS yang lebih besar.

- 1) Beban Kecil (Lampu 1 W)

Sama seperti pengujian sebelumnya, beban lampu 1 W tidak menyebabkan trip baik pada kurva SI maupun EI. Hal ini menegaskan bahwa perubahan TMS tidak berpengaruh apabila arus belum mencapai pickup.

- 2) Beban Besar (Setrika 1 + Setrika 2)

Pengujian dengan kombinasi Setrika 1 (350 W) dan Setrika 2 (300 W) menghasilkan total daya sebesar 650 W. Arus terukur pada kondisi ini adalah 2,95 A, sehingga diperoleh nilai multiple of pickup (M) sebesar 4,92. Nilai M yang jauh lebih besar dari 1 menunjukkan bahwa arus telah melampaui batas pickup (Iset = 0,6 A).

[ISSN 2714-7444 \(online\)](https://doi.org/10.21070/acopen.11.2026.14715), <https://acopen.umsida.ac.id>, published by [Universitas Muhammadiyah Sidoarjo](https://www.muhammadiyah.ac.id)

Copyright © Author(s). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY).

Pada kondisi ini, baik kurva Standard Inverse (SI) maupun Extremely Inverse (EI) bekerja dengan baik dan menyebabkan relay membuka (trip). Namun, karena nilai TMS pada pengujian ini lebih besar, maka waktu trip yang dihasilkan menjadi lebih lama dibandingkan dengan pengujian TMS sebelumnya. Meskipun demikian, kurva EI tetap memiliki waktu trip lebih cepat dibandingkan kurva SI karena karakteristik inverse yang lebih tajam.

3) Beban Menengah (Setrika + Lampu 9 W)

Pengujian beban menengah dilakukan menggunakan kombinasi setrika dan lampu, yaitu:

Setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W)

Setrika 2 (300 W) + Lampu (9 W)

Pada kombinasi Setrika 1 dan lampu, arus terukur sebesar 1,63 A dengan nilai $M = 2,72$, sedangkan pada kombinasi Setrika 2 dan lampu arus terukur sebesar 1,40 A dengan nilai $M = 2,33$. Kedua nilai M tersebut berada di atas nilai pickup, sehingga OCR berada pada daerah kerja.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada kondisi beban menengah ini, relay tetap mengalami trip (terbuka) baik pada kurva SI maupun EI. Namun, dibandingkan dengan beban besar, waktu trip menjadi lebih lama karena nilai M lebih kecil. Selain itu, peningkatan nilai TMS menyebabkan waktu trip lebih panjang dibandingkan pada pengujian TMS sebelumnya [14].

C. Analisis

Analisis ini bertujuan untuk membandingkan hasil uji eksperimental OCR dengan perhitungan waktu trip secara teoritis berdasarkan standar IEC 60255 pada karakteristik Standard Inverse (SI) dan Extremely Inverse (EI). Parameter utama yang digunakan adalah arus pickup ($I_{set} = 0,6$ A), multiple of pickup (M), serta Time Multiplier Setting (TMS).

1 Analisis Perbandingan Hasil Uji Dengan Perhitungan Teori

Perhitungan teori menggunakan rumus sebagai berikut :

$$t = \frac{K \times TMS}{M^\alpha - 1}$$

dengan :

t = waktu kerja relay (detik)

TMS = Time Multiplier Setting

M = Multiple of Pickup

$M = I / I_{pickup}$

I = arus gangguan (A)

I_{pickup} = arus setting relay (A)

K dan α = konstanta sesuai jenis karakteristik relay

Untuk masing-masing karakteristik yang digunakan dalam penelitian ini, nilai konstanta adalah sebagai berikut:

a. Standard Inverse

$$\text{Time Standard Inverse} = \frac{0,14 \times TMS}{M^{0,02} - 1}$$

b. Extremely Inverse

$$\text{Time Extremely Inverse} = \frac{80 \times TMS}{M^2 - 1}$$

1) Tabel Uji 1 Dengan TMS (0,15 dan 0,03)

No. 1 dengan beban 1 lampu (1 W) – Kurva Standard Inverse

Hitung arus beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1}{220} = 0,004 = 0,004 A$$

Hitung Multiple of Pickup

$$M = \frac{I}{I_{set}} = \frac{0,04}{0,6} = 0,007$$

Karena $M < 1$, maka arus belum mencapai pickup, sehingga relay tidak bekerja

No. 2 dengan beban 1 lampu (1 W) – Kurva Extremely Inverse

Hitung arus beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1}{220} = 0,0045 = 0,004 A$$

Hitung Multiple of Pickup

$$M = \frac{I}{I_{set}} = \frac{0,04}{0,6} = 0,007$$

Karena $M < 1$, maka arus belum mencapai pickup, sehingga relay tidak bekerja

No. 3 dengan beban setrika 1 (350 W) + setrika 2 (300 W) – kurva Standard Inverse

Daya total

$$I = 350 + 300 = 650 W$$

Arus Beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{650}{220} = 2,95 A$$

Multiple of Pickup

$$M = \frac{2,95}{0,6} = 4,92$$

Waktu Trip

$$t = \frac{0,14 \times 0,15}{4,92^{0,02} - 1}$$

$$t = \frac{0,021}{1,032 - 1}$$

$$t = \frac{0,021}{0,032} = 1,27 \text{ detik}$$

No. 4 dengan beban setrika 1 (350 W) + setrika 2 (300 W) – kurva Extremely Inverse

Dengan daya dan arus sama

Multiple of Pickup

$$M = \frac{2,95}{0,6} = 4,92$$

Waktu Trip

$$t = \frac{80 \times 0,03}{4,92^2 - 1}$$

$$t = \frac{2,4}{24,2 - 1}$$

$$t = 2,4 / (23,2) = 0,10 \text{ detik}$$

No. 5 dengan beban setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W) – kurva Standard Inverse

Daya total

$$I = 350 + 9 = 359 \text{ W}$$

Arus Beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{359}{220} = 1,63 \text{ A}$$

Multiple of Pickup

$$M = \frac{1,63}{0,6} = 2,72$$

Waktu Trip

$$t = \frac{0,14 \times 0,15}{2,72^{0,02} - 1}$$

$$t = \frac{0,021}{1,020 - 1}$$

$$t = \frac{0,021}{0,020} = 2,85 \text{ detik}$$

No. 6 dengan beban setrika 1 (350 W) + lampu (9 W) – kurva Extremely Inverse

Dengan daya dan arus sama, Multiple of Pickup :

$$M = \frac{1,63}{0,6} = 2,72$$

Waktu Trip

$$t = \frac{80 \times 0,03}{2,72^2 - 1}$$

$$t = \frac{2,4}{7,40 - 1}$$

$$t = \frac{2,4}{6,40} = 0,44 \text{ detik}$$

No. 7 dengan beban setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W) – kurva Standard Inverse

Daya total

$$I = 300 + 9 = 309 \text{ W}$$

Arus Beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{309}{220} = 1,40 \text{ A}$$

Multiple of Pickup

$$M = \frac{1,40}{0,6} = 2,33$$

Waktu Trip

$$t = \frac{0,14 \times 0,15}{2,33^{0,02} - 1}$$

$$t = \frac{0,021}{1,017 - 1}$$

$$t = \frac{0,021}{0,017} = 3,65 \text{ detik}$$

No. 8 dengan beban setrika 1 (350 W) + lampu (9 W) – kurva Extremely Inverse

Dengan daya dan arus sama, Multiple of Pickup :

$$M = \frac{1,40}{0,6} = 2,33$$

Waktu Trip

$$t = \frac{80 \times 0,03}{2,33^2 - 1}$$

$$t = \frac{2,4}{5,43 - 1}$$

$$t = \frac{2,4}{4,43} = 0,67 \text{ detik}$$

2) Tabel Uji 2 Dengan TMS (0,25 dan 0,06)

No. 1 dengan beban 1 lampu (1 W) – Kurva Standard Inverse

Hitung arus beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1}{220} = 0,0045 = 0,004 \text{ A}$$

Hitung Multiple of Pickup

$$M = \frac{I}{I_{set}} = \frac{0,04}{0,6} = 0,007$$

Karena $M < 1$, maka arus belum mencapai pickup, sehingga relay tidak bekerja

No. 2 dengan beban 1 lampu (1 W) – Kurva Extremely Inverse

Hitung arus beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1}{220} = 0,0045 = 0,004 \text{ A}$$

Hitung Multiple of Pickup

$$M = \frac{I}{I_{set}} = \frac{0,04}{0,6} = 0,007$$

Karena $M < 1$, maka arus belum mencapai pickup, sehingga relay tidak bekerja

No. 3 dengan beban setrika 1 (350 W) + setrika 2 (300 W) – kurva Standard Inverse

Daya total

$$I = 350 + 300 = 650 \text{ W}$$

Arus Beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{650}{220} = 2,95 \text{ A}$$

Multiple of Pickup

$$M = \frac{2,95}{0,6} = 4,92$$

Waktu Trip

$$t = \frac{0,14 \times 0,25}{4,92^2 - 1}$$

$$t = \frac{0,035}{1,032 - 1}$$

$$t = \frac{0,035}{0,032} = 2,19 \text{ detik}$$

o. 4 dengan beban setrika 1 (350 W) + setrika 2 (300 W) – kurva Extremely Inverse Dengan

daya dan arus sama

Multiple of Pickup

$$M = \frac{2,95}{0,6} = 4,92$$

Waktu Trip

$$t = \frac{80 \times 0,06}{4,92^2 - 1}$$

$$t = \frac{4,8}{24,2 - 1}$$

$$t = \frac{4,8}{23,2} = 0,21 \text{ detik}$$

No. 5 dengan beban setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W) – kurva Standard Inverse

Daya total

$$I = 350 + 9 = 359 \text{ W}$$

Arus Beban

$$I = \frac{P}{V} = \frac{359}{220} = 1,63 \text{ A}$$

Multiple of Pickup

$$M = \frac{1,63}{0,6} = 2,72$$

Waktu Trip

$$t = \frac{0,14 \times 0,25}{2,72^{0,02} - 1}$$

$$t = \frac{0,035}{1,020 - 1}$$

$$t = \frac{0,035}{0,020} = 4,75 \text{ detik}$$

No. 6 dengan beban setrika 1 (350 W) + lampu (9 W) – kurva Extremely Inverse

Dengan daya dan arus sama, Multiple of Pickup :

$$M = \frac{1,63}{0,6} = 2,72$$

Waktu Trip

$$t = \frac{80 \times 0,06}{2,72^2 - 1}$$

$$t = \frac{4,8}{7,40 - 1}$$

$$t = \frac{4,8}{6,40} = 0,75 \text{ detik}$$

No. 7 dengan beban setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W) – kurva Standard Inverse

Daya total

$$I = 300 + 9 = 309 \text{ W}$$

Arus Beban

[ISSN 2714-7444 \(online\)](https://acopen.umsida.ac.id), <https://acopen.umsida.ac.id>, published by [Universitas Muhammadiyah Sidoarjo](https://www.umsida.ac.id)

Copyright © Author(s). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY).

$$I = \frac{P}{V} = \frac{309}{220} = 1,40 \text{ A}$$

Multiple of Pickup

$$M = \frac{1,40}{0,6} = 2,33$$

Waktu Trip

$$t = \frac{0,14 \times 0,25}{2,33^{0,02} - 1}$$

$$t = \frac{0,035}{1,017 - 1}$$

$$t = \frac{0,035}{0,017} = 6,08 \text{ detik}$$

No. 8 dengan beban setrika 1 (350 W) + lampu (9 W) – kurva Extremely Inverse

Dengan daya dan arus sama, Multiple of Pickup :

$$M = \frac{1,40}{0,6} = 2,33$$

Waktu Trip

$$t = \frac{80 \times 0,06}{2,33^2 - 1}$$

$$t = \frac{4,8}{5,43 - 1}$$

$$t = \frac{4,8}{4,43} = 1,08 \text{ detik}$$

2. Perbandingan Uji Alat dan Perhitungan Teori

Analisis ini bertujuan untuk membandingkan hasil dengan melihat apakah sesuai dengan teori yang ada.

TMS 1 (SI = 0,15 ; EI = 0,03)

Kurva Standard Inverse (SI), TMS = 0,15

No.	Jenis Beban	Daya	Arus	M = I/Iset	Waktu Trip (Teori) (s)	Hasil Uji	Kesesuaian
1	1 Lampu	1	0,04	0,07	Tidak Trip	Tidak Trip	Sesuai
2	Setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W)	359	1,63	2,72	2,85	Trip	Sesuai
3	Setrika 1 + Setrika 2	650	2,95	4,92	1,31	Trip	Sesuai
4	Setrika 2 + Lampu (9 W)	309	1,40	2,33	3,65	Trip	Sesuai

Kurva Standard Inverse (EI), TMS = 0,03

No	Jenis Beban	Daya	Arus	M = I/Iset	Waktu Trip (Teori) (s)	Hasil Uji	Kesesuaian
1	1 Lampu	1	0,04	0,07	Tidak Trip	Tidak Trip	Sesuai
2	Setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W)	359	1,63	2,72	2,85	Trip	Sesuai
3	Setrika 1 + Setrika	650	2,95	4,92	0,10	Trip	Sesuai

	2						
4	Setrika 2 + Lampu (9 W)	309	1,40	2,33	0,54	Trip	Sesuai

TMS 2 (SI = 0,25 ; EI = 0,06)

Kurva Standard Inverse (SI), TMS = 0,25

No.	Jenis Beban	Daya	Arus	M = I/Iset	Waktu Trip (Teori) (s)	Hasil Uji	Kesesuaian
1	1 Lampu	1	0,04	0,07	Tidak Trip	Tidak Trip	Sesuai
2	Setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W)	359	1,63	2,72	4,75	Trip	Sesuai
3	Setrika 1 + Setrika 2	650	2,95	4,92	2,19	Trip	Sesuai
4	Setrika 2 + Lampu (9 W)	309	1,40	2,33	6,08	Trip	Sesuai

Kurva Standard Inverse (EI), TMS = 0,03

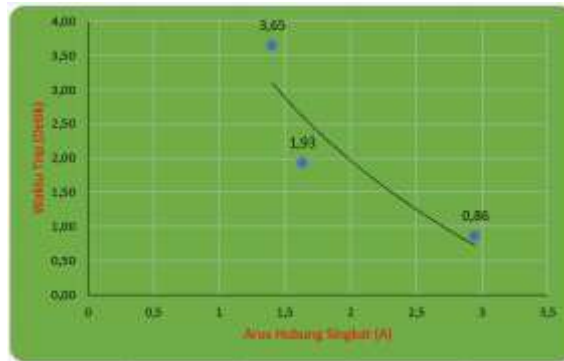
No.	Jenis Beban	Daya	Arus	M = I/Iset	Waktu Trip (Teori)(s)	Hasil Uji	Kesesuaian
1	1 Lampu	1	0,04	0,07	Tidak Trip	Tidak Trip	Sesuai
2	Setrika 1 (350 W) + Lampu (9 W)	359	1,63	2,72	0,75	Trip	Sesuai
3	Setrika 1 + Setrika 2	650	2,95	4,92	0,21	Trip	Sesuai
4	Setrika 2 + Lampu (9 W)	309	1,40	2,33	1,08	Trip	Sesuai

Berdasarkan hasil perhitungan teori dan pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kinerja OCR inverse yang dirancang telah sesuai dengan karakteristik standar IEC 60255 baik untuk kurva Standard Inverse (SI) maupun Extremely Inverse (EI). Pada kondisi beban kecil dengan nilai multiple of pickup (M) lebih kecil dari 1, seperti pengujian menggunakan lampu berdaya rendah, relay tidak bekerja (tidak trip) baik secara teori maupun praktik, yang menunjukkan bahwa sistem memiliki selektivitas yang baik dan tidak menimbulkan false trip pada beban normal. Pada kondisi beban menengah dengan nilai M berada pada rentang 1 hingga 3, waktu trip relay mulai muncul dan menunjukkan perbedaan yang jelas antara kurva SI dan EI, di mana kurva SI menghasilkan waktu trip yang lebih lama dan meningkat seiring kenaikan nilai Time Multiplier Setting (TMS), sedangkan kurva EI memberikan respon trip yang lebih cepat pada nilai M yang sama.

Selanjutnya, pada kondisi beban besar dengan nilai M lebih dari 3, kedua kurva menunjukkan penurunan waktu trip yang signifikan, namun kurva EI tetap memiliki waktu trip paling singkat dibandingkan kurva SI, sehingga lebih efektif untuk mengamankan sistem dari gangguan arus besar. Perbandingan antara TMS 1 dan TMS 2 menunjukkan bahwa semakin besar nilai TMS yang digunakan, maka waktu trip yang dihasilkan juga semakin lama, baik pada kurva SI maupun EI, yang menegaskan fungsi TMS sebagai faktor pengali waktu dalam koordinasi proteksi. Secara keseluruhan, hasil pengujian lapangan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil perhitungan teori, sehingga dapat disimpulkan bahwa implementasi OCR inverse berbasis ESP32 pada penelitian ini mampu merepresentasikan prinsip kerja relay proteksi arus lebih secara akurat, selektif, dan andal [15].

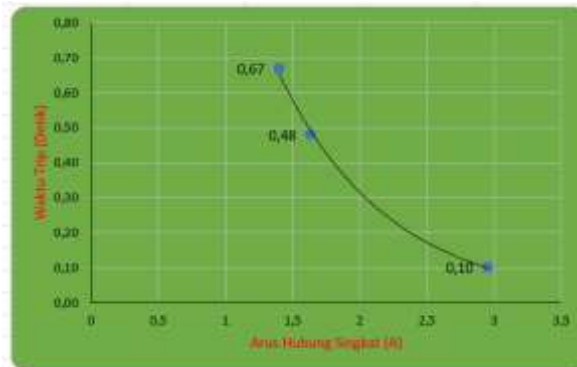
Hasil Kurva OCR dengan beberapa variasi TMS pada Standard Inverse dan Extremely Inverse

a. Tms 1 (0,15 s) Standard Inverse



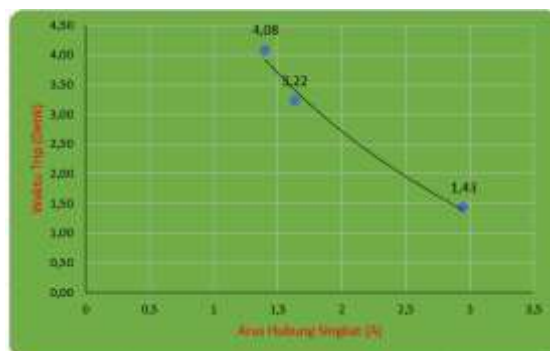
Dapat disimpulkan bahwa waktu kerja relay berbanding terbalik dengan besar arus hubung singkat. Pada arus yang relatif kecil, relay bekerja dengan waktu yang lebih lama, sedangkan peningkatan arus hubung singkat menyebabkan waktu trip menurun secara signifikan. Hal ini terlihat dari titik pengujian sekitar 1,5 A dengan waktu trip $\pm 3,65$ detik, yang kemudian menurun menjadi $\pm 1,93$ detik pada arus sekitar 1,7 A, dan semakin cepat menjadi $\pm 0,86$ detik saat arus meningkat hingga sekitar 3 A.

b. TMS 1 (0,03 s) Extremely Inverse



Dapat disimpulkan bahwa relay menunjukkan respon yang sangat cepat terhadap kenaikan arus hubung singkat, dengan karakteristik penurunan waktu trip yang jauh lebih tajam dibandingkan kurva Standard Inverse. Pada arus sekitar 1,5 A, waktu trip masih berada pada kisaran 0,67 detik, kemudian menurun menjadi sekitar 0,48 detik saat arus meningkat mendekati 1,7 A, dan turun drastis hingga sekitar 0,10 detik pada arus ± 3 A. Pola kurva ini menegaskan sifat Extremely Inverse, di mana sedikit peningkatan arus di atas arus pickup langsung menghasilkan pengurangan waktu trip yang signifikan.

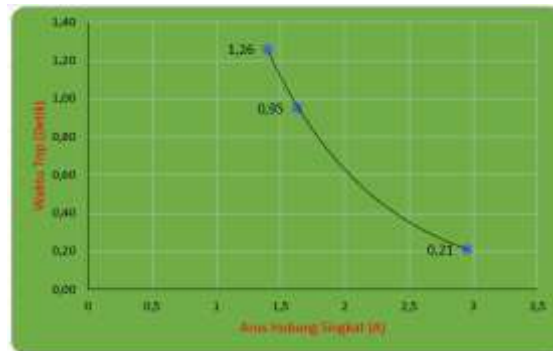
c. TMS 2 (0,25 s) Standard Inverse



Berdasarkan grafik OCR Standard Inverse dengan TMS 2, dapat disimpulkan bahwa peningkatan nilai Time Multiplier Setting (TMS) menyebabkan waktu trip relay menjadi lebih lama pada setiap tingkat arus hubung singkat dibandingkan pengujian dengan TMS yang lebih kecil. Pada arus sekitar 1,5 A, waktu trip tercatat sekitar 4,08 detik, kemudian menurun menjadi 3,22 detik saat arus meningkat ke kisaran 1,7 A, dan semakin berkurang hingga sekitar 1,43 detik pada arus ± 3 A. Pola kurva tetap menunjukkan karakteristik inverse, yaitu semakin besar arus gangguan maka semakin singkat waktu

pemutusan, namun dengan gradien yang lebih landai akibat pengaruh TMS yang lebih besar.

d. TMS 2 (0,06 s) Extremely Inverse



Berdasarkan grafik OCR Extremely Inverse dengan TMS 2, dapat disimpulkan bahwa relay menunjukkan respon pemutusan yang sangat cepat terhadap kenaikan arus hubung singkat, meskipun nilai TMS lebih besar dibandingkan pengujian TMS 1 [16]. Pada arus sekitar 1,5 A, waktu trip tercatat sekitar 1,26 detik, kemudian menurun menjadi 0,95 detik pada arus $\pm 1,7$ A, dan semakin cepat hingga sekitar 0,21 detik ketika arus meningkat mendekati 3 A. Kurva yang terbentuk memiliki kemiringan yang tajam, mencerminkan karakteristik extremely inverse, di mana waktu kerja relay berkurang secara signifikan seiring peningkatan arus gangguan [17]. Meskipun demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu trip aktual masih memiliki selisih kecil terhadap perhitungan teoritis. Selisih tersebut dipengaruhi oleh keterlambatan pembacaan sensor, waktu eksekusi program pada ESP32, serta respon mekanis modul relay saat melakukan proses pemutusan beban. Pengaruh respon mekanis relay menjadi lebih terlihat pada karakteristik Extremely Inverse karena karakteristik ini memiliki waktu trip yang relatif sangat cepat dibandingkan Standard Inverse. Namun demikian, selisih yang terjadi masih berada dalam batas toleransi yang wajar dan tidak mempengaruhi kesesuaian karakteristik OCR yang dihasilkan terhadap standar IEC 60255.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, pemrograman, dan pengujian sistem, dapat disimpulkan bahwa sistem Monitoring Overcurrent Relay berbasis ESP32 dengan karakteristik Standard Inverse dan Extremely Inverse telah berhasil direalisasikan dan berfungsi sesuai dengan tujuan yang direncanakan. Sistem mampu mendeteksi arus lebih berdasarkan nilai arus pickup sebesar 0,6 A serta melakukan pemutusan beban melalui modul relay active low dengan respon yang sesuai karakteristik waktu yang dipilih. Implementasi sensor arus PZEM-004T, LCD I2C, push button, serta monitoring melalui aplikasi berbasis IoT menunjukkan bahwa sistem bekerja secara terintegrasi dan stabil.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa waktu trip relay yang diperoleh dari sistem memiliki kecenderungan sedikit lebih besar dibandingkan perhitungan teori IEC 60255 dan hasil perhitungan pada program. Namun, selisih waktu tersebut masih berada dalam batas toleransi yang wajar dan disebabkan oleh faktor keterlambatan pembacaan sensor, waktu eksekusi program ESP32, serta respon mekanis relay. Perbandingan antara karakteristik Standard Inverse dan Extremely Inverse pada arus yang sama membuktikan bahwa kurva Extremely Inverse menghasilkan waktu trip yang lebih cepat, sesuai dengan teori proteksi sistem tenaga listrik. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan tidak hanya layak digunakan sebagai simulator proteksi arus lebih, tetapi juga efektif sebagai media pembelajaran dan pengujian konsep overcurrent relay berbasis mikrokontroler.

Sebagai rekomendasi, penelitian selanjutnya dapat menggunakan sensor arus dengan tingkat akurasi dan kecepatan sampling yang lebih tinggi, serta perangkat switching dengan respon yang lebih cepat seperti solid state relay (SSR) untuk mengurangi selisih waktu trip terhadap perhitungan teori. Selain itu, optimasi algoritma pemrosesan data pada ESP32 dan pengujian pada skala sistem yang lebih kompleks dengan koordinasi beberapa relay proteksi dapat dilakukan guna meningkatkan akurasi, keandalan, dan kesesuaian sistem terhadap implementasi proteksi pada jaringan tenaga listrik yang sesungguhnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada dosen pembimbing, pihak institusi, serta semua pihak yang telah memberikan dukungan, arahan, dan bantuan dalam penyusunan artikel ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang sistem proteksi tenaga listrik dan teknologi berbasis IoT.

References

- [1] M. Aref, M. M. El-Saadawi, and R. A. El-Sehiemy, "Enhancement of the operating time of the overcurrent relay considering coordination constraints in IEEE power systems," *Results in Engineering*, vol. 26, p. 101245, 2025.
- [2] R. Hidayat and E. Putra, "Perancangan rele arus lebih dengan karakteristik inverse berbasis mikrokontroler ATmega 8535," *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 101–108, 2017.
- [3] A. Iskandar, S. Mahmud, and H. Kurniawan, "Analisis kinerja proteksi over current relay (OCR) di gardu induk 150/20 kV," *JPE: Journal of Power and Energy Systems*, vol. 5, no. 2, pp. 142–150, 2022.
- [4] R. S. Panjaitan, R. Situmeang, and M. Simanjuntak, "Simulasi kinerja operasi over current relay (OCR) pada gangguan" <https://acopen.umsida.ac.id>, published by [Universitas Muhammadiyah Sidoarjo](https://www.muhammadiyah.ac.id) ISSN 2714-7444 (online).

hubung singkat dengan penyesuaian pengaturan waktu karakteristik standard inverse IEC,” *INTECOM: Journal of Information Technology and Computer Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 317–325, 2023.

- [5] Y. S. Parada, Y. Pramudya, and S. Hadi, “Feasibility and performance evaluation of microprocessor and fuzzy logic-based overcurrent relay in electrical protection systems,” *BITE: Journal of Electrical and Information Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 85–94, 2022.
- [6] A. R. Pratama, “Rancang bangun prototipe rele arus lebih dengan karakteristik inverse berbasis Arduino pada laboratorium sistem daya elektrik,” Skripsi, Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia, 2018.
- [7] A. Rahman, M. Yusuf, and D. Lestari, “Analisis setting proteksi over current relay (OCR) pada generator 30 MW,” *FORISTEK: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 11, no. 1, pp. 33–41, 2021.
- [8] R. Siregar and M. Fauzan, “Coordination analysis of OCR and GFR protection system on substation,” *Teletronic: Journal of Telecommunication and Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 1–8, 2021.
- [9] A. Suhendar and A. Nugroho, “Design of an Arduino-based inverse type overcurrent relay,” *EMITOR: Jurnal Teknik Elektro*, vol. 19, no. 2, pp. 79–86, 2019.
- [10] Suryanto and S. Watmah, “Pemantauan catu daya untuk proteksi listrik menggunakan ESP32 berbasis Internet of Things,” *IMTechno: Journal of Industrial Management and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 117–126, 2023.
- [11] D. Zalasena and A. Paramytha, “Sistem monitoring arus dan tegangan berbasis Internet of Things menggunakan sensor PZEM-004T dan Blynk,” *ZETROEM: Journal of Electrical Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 45–53, 2022.
- [12] E. Zarour, F. Alasali, O. Alsmadi, and N. El-Naily, “A new adaptive protection approach for overcurrent relays using novel nonstandard current-voltage characteristics,” *Electric Power Systems Research*, vol. 216, p. 109083, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.109083.
- [13] D. Babic, I. Jovic, T. Popovic, N. Kovac, and S. Cacic, “An Internet of Things System for Environmental Monitoring Based on ESP32 and Blynk,” in 2022 26th International Conference on Information Technology (IT), Zabljak, Montenegro, 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/IT54280.2022.9743538.
- [14] S. Syukriyadin, I. D. Sara, and F. Mashuri, “Design of a Digital Standard Inverse Overcurrent Relay Using Arduino Uno as a Microcontroller,” in 2018 International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICELTICS), Banda Aceh, Indonesia, 2018, pp. 45–50, doi: 10.1109/ICELTICS.2018.8548835.
- [15] N. Chang, G. Song, J. Hou, and Z. Chang, “Fault identification method based on unified inverse-time characteristic equation for distribution network,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 146, p. 108734, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2022.108734.
- [16] 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, Jun. 2025, doi: 10.46964/poligrid.v6i1.66.
- [17] C. Z. I. Arnob, N. S. Mitra, A. Bin Hashem Saad, Md. T. Alam, M. Islam, and A. S. N. Huda, “Smart Load Monitoring and Controlling Approach Connected to Solar System Using ESP32 and Blynk,” in 2022 International Conference on Energy and Power Engineering (ICEPE), Dhaka, Bangladesh, 2022, pp. 1–5, doi: 10.1109/ICEPE56629.2022.10044898.