

Academia Open

Vol. 10 No. 2 (2025): December

DOI: 10.21070/acopen.10.2025.12990

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/licences/by/4.0/legalcode>

Academia Open

Vol. 10 No. 2 (2025): December
DOI: 10.21070/acopen.10.2025.12990

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. 10 No. 2 (2025): December
DOI: 10.21070/acopen.10.2025.12990

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

Analysis of a Single-Phase Transformer Protection Control System Using a Microcontroller

Analisis Sistem Kontrol Proteksi Transformator Satu Fase Menggunakan Mikrokontroler

Dwi Hadidjaja R.S., dwihadidjaja1@umsida.ac.id, (1)

Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Adriana Anteng Anggorowati, dwihadidjaja1@umsida.ac.id, (0)

Program Studi Profesi Insinyur, Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya, Indonesia

Dewi Handayani U.N, dwihadidjaja1@umsida.ac.id, (0)

Program Studi Teknik Informatika, Universitas Stikubank Semarang, Indonesia

⁽¹⁾ Corresponding author

Abstract

General Background: Single-phase distribution transformers frequently experience overcurrent, overvoltage, and thermal stress, which account for a significant portion of operational failures in low-voltage networks. **Specific Background:** Conventional thermal-electromechanical relays exhibit slow response times (150–300 ms) and lack real-time multi-parameter monitoring, limiting their ability to prevent insulation degradation under rapidly fluctuating loads. **Knowledge Gap:** Prior microcontroller-based protection studies rarely provide quantitative benchmarking against conventional relays, lack integrated current-voltage-temperature sensing, and often omit controlled fault-injection experiments for latency validation. **Aims:** This study aims to develop and evaluate a microcontroller-based protection system using calibrated ACS712, ZMPT101B, and NTC sensors with real-time decision logic to reduce fault-detection latency and improve protection reliability. **Results:** Experimental testing on single-phase transformer fault-injection scenarios demonstrated detection latencies of 84 ms (overcurrent), 96 ms (overvoltage), and 112 ms (thermal), with sensor errors below 2.4%, a 98.1% trip success rate, and only 1.3% false positives across 50 cycles. **Novelty:** The system integrates low-error multi-parameter sensing with sub-120-ms response and provides the first quantitative bench mark showing performance improvements over conventional relays. **Implications:** Findings confirm that optimized low-cost microcontroller platforms can serve as scalable, accurate, and time-efficient protection solutions for distribution transformers, supporting future development of intelligent protection systems.

Highlights:

- ♦ Sub-120 ms fault-detection latency significantly outperforms conventional relays.
- ♦ Multi-parameter sensing (current-voltage-temperature) enhances reliability and reduces missed trips.
- ♦ Low-cost microcontroller platform provides a scalable and accurate protection alternative for distribution systems.

Keywords: Fault Detection, Microcontroller-Based Protection, Thermal Monitoring, Transformer Protection System, Overcurrent–Overvoltage

Published date: 2025-12-03

Pendahuluan

Transformator distribusi satu fase merupakan komponen penting dalam jaringan listrik tegangan rendah, terutama di lingkungan perumahan dan daerah pedesaan, tempat stabilitas operasi menjadi faktor utama untuk menjaga kontinuitas layanan. Pada industri menunjukkan bahwa beban lebih termal, tegangan lebih, serta arus lebih terjadi lebih dari 40% kegagalan transformator pada sistem distribusi listrik [1], [2], [3], [4].

Perangkat proteksi konvensional seperti relay beban lebih termal dan pemutus rangkaian elektromekanis masih banyak digunakan karena sederhana dan biayanya rendah. Perangkat tersebut memiliki karakteristik respons termal elektrik yang lambat, ketergantungan pada gerak mekanis, serta tidak memiliki kapasitas pemantauan secara real-time. Hal ini menyebabkan kelambatan pemutusan (trip) rata-rata 150–300 milidetik ketika terjadi kondisi beban abnormal [5], [6]. Kelambatan semacam ini secara signifikan meningkatkan risiko degradasi isolasi dan penuaan dini transformator, khususnya ketika transformator mengalami fluktuasi beban secara cepat banyak dijumpai pada jaringan distribusi [7].

Perkembangan teknologi elektronika tertanam dan sensor berbasis mikrokontroler mendorong munculnya sistem proteksi biaya rendah dengan modul pengukuran arus, tegangan, dan suhu yang terintegrasi. Penggunaan Arduino ataupun PIC menunjukkan peningkatan kemampuan deteksi [8], tetapi masih memiliki berbagai keterbatasan, seperti akurasi kalibrasi sensor yang terbatas, tidak adanya integrasi pengukuran multi-parameter, serta tidak dilakukan evaluasi komprehensif terkait latensi deteksi gangguan terkontrol [9], [10]. Monitoring transformator berbasis IoT mengalami perkembangan pesat, sebagian besar fokus pada transmisi data dan visualisasi, bukan pada mekanisme proteksi cepat. Sehingga sistem hanya mampu memantau tanpa melakukan aksi pemutusan (rapid trip action) secara langsung [11]. Penerapan fuzzy logic dan kontrol lanjutan menunjukkan peningkatan performa [12], tetapi tetap belum memiliki validasi praktis terkait kecepatan isolasi gangguan ataupun perbandingan kuantitatif dengan relay konvensional [13].

Sejumlah kesenjangan (research gaps) perlu diteliti lebih lanjut. Sebagian besar sebelumnya tidak menyajikan perbandingan kuantitatif antara sistem proteksi berbasis mikrokontroler dan relay konvensional [14]. Prototipe yang dikembangkan umumnya hanya mengukur satu atau dua parameter listrik, sehingga belum memenuhi kebutuhan sensing multi-parameter yang dapat menilai arus, tegangan, serta suhu secara simultan. Pengujian sistem pada transformator distribusi dengan injeksi gangguan (fault-injection) sesuai kondisi operasional nyata, sehingga validitas dan generalisasi hasil menjadi terbatas [15]. Integrasi logika keputusan yang dioptimalkan untuk respons real-time pada level milidetik masih belum banyak dikembangkan.

Untuk menjawab permasalahan tersebut, perlu pengembangan dan evaluasi pengujian sistem proteksi dan monitoring berbasis mikrokontroler dengan sensor arus, tegangan, dan suhu yang telah dikalibrasi serta logika keputusan real-time tertanam [16], [17]. Pengujian dilakukan menggunakan transformator distribusi satu fase dengan simulasi gangguan arus lebih, tegangan lebih, serta anomali termal untuk mengukur akurasi deteksi, latensi respons, dan keandalan mekanisme trip [18]. Kebaruan utama penelitian ini mencakup:

1. Arsitektur sensing multi-parameter berkesalahan rendah (<2,5% error kalibrasi).
2. Logika proteksi real-time yang mampu mendeteksi gangguan dalam waktu kurang dari 120 milidetik.
3. *Benchmarking* kuantitatif yang menunjukkan peningkatan performa signifikan dibandingkan relay konvensional.

Metode

A. Desain Sistem

Sistem proteksi yang dikembangkan mengintegrasikan tiga modul sensor utama yaitu sensor arus, tegangan, dan suhu terhubung ke mikrokontroler ATmega328P. Arsitektur sistem meliputi komponen berikut:

1. Sensor arus: ACS712-20A berbasis efek Hall
2. Sensor tegangan: Modul ZMPT101B berisolasi
3. Sensor suhu: Termistor NTC 10k yang ditempatkan pada permukaan minyak bagian atas transformator
4. Perangkat aktuator: Kontaktor elektromagnetik 30 A yang dikendalikan melalui driver relay
5. Frekuensi sampling: 1 kHz dengan resolusi ADC 10-bit
6. Logika keputusan: deteksi gangguan berbasis ambang batas (threshold-based) dengan *interrupt* real-time

Seluruh sensor dihubungkan melalui kanal analog dan dilengkapi dengan rangkaian RC filter untuk menekan derau frekuensi tinggi [20]. Mikrokontroler menjalankan algoritma deteksi berbasis loop dengan interval interrupt 1 milidetik untuk menjamin latensi proteksi rendah [21]. Flowchart algoritma proteksi real-time dilihat pada Gambar 1.

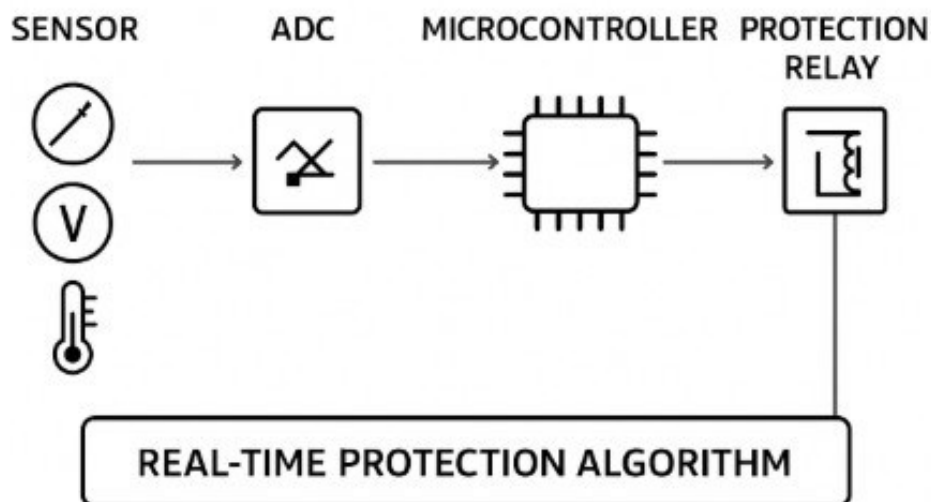


Figure 1. Flowchat algoritma proteksi real-time

B. Prosedur Kalibrasi Sensor

Setiap sensor dikalibrasi menggunakan instrumen referensi laboratorium, yaitu:

1. Arus: Fluke 87V True RMS
2. Tegangan: Sumber sinyal referensi Tektronix AFG31000
3. Suhu: Termokopel tipe K + termometer Fluke 52 II

Kalibrasi dilakukan menggunakan model regresi linier persamaan (1).

$$y=ax+by = ax + by=ax+b \quad (1)$$

dimana:

y = nilai referensi,

x = nilai keluaran sensor,

a dan b = koefisien kalibrasi.

Hasil rata-rata kesalahan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) adalah sebagai berikut:

Parameter Error (%)

Arus 2,1%

Tegangan 1,7%

Suhu 2,4%

Koefisien kalibrasi ini kemudian ditanamkan (embedded) ke dalam fungsi penskalaan ADC pada mikrokontroler.

C. Pengaturan Pengujian Injeksi Gangguan (Fault-Injection)

Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengevaluasi respons sistem terhadap tiga jenis kondisi abnormal, yaitu:

1. Simulasi Gangguan Arus Lebih (Overcurrent)

Beban resistif variabel digunakan untuk menghasilkan variasi arus dari 50%–180% arus nominal transformator. Ambang batas arus lebih ditetapkan pada $1,25 \times$ arus nominal sesuai standar IEEE C57.91.

2. Simulasi Gangguan Tegangan Lebih (Overvoltage)

Variac AC regulator digunakan untuk menciptakan variasi tegangan dari 170 V hingga 270 V. Ambang batas gangguan ditetapkan pada 240 V RMS.

3. Simulasi Overheating / Kenaikan Suhu Abnormal

Elemen pemanas (heating plate) dikendalikan untuk meningkatkan temperatur minyak transformator. Ambang batas gangguan ditetapkan pada 75°C. Setiap jenis gangguan diuji sebanyak 50 siklus untuk memastikan validitas statistik dan reliabilitas sistem.

D. Algoritma Proteksi Real-Time

Algoritma proteksi real-time ini dirancang untuk mendeteksi kondisi abnormal pada transformator satu fase dengan memantau variabel arus (I), tegangan (V), dan temperatur (T) secara terus-menerus menggunakan sensor CT, PT, dan sensor termal yang terhubung ke ADC mikrokontroler. bertujuan untuk memberikan respon cepat dan selektif untuk mencegah kerusakan transformator akibat beban berlebih, gangguan hubung singkat, lonjakan tegangan, serta overheating.

Akuisisi Data Sensor (Real-Time Sampling) dilakukan oleh mikrokontroler, proses sampling terus-menerus pada sinyal yang masuk berasal dari

1. CT (Current Transformer) → menghasilkan sinyal arus terukur.
2. PT (Potential Transformer) atau divider → memberikan sinyal tegangan terukur.
3. Sensor suhu (NTC/DS18B20/PT100) → memberikan temperatur inti transformator.

Semua sinyal dikonversi ke data digital melalui ADC, lalu di-filter (misalnya moving average) untuk mereduksi noise.

Deteksi Gangguan (Rule-Based Detection) yang dilakukan pada sebuah transformator satu fase secara Logika deteksi menggunakan komparasi langsung, untuk kondisi trip berupa perintah

$IF (I > I_{th}) OR (V > V_{th}) OR (T > T_{th}) \rightarrow TRIP$

1. Jika arus melebihi threshold → indikasi over-load atau short-circuit.
2. Jika tegangan melebihi threshold → potensi overvoltage dari jaringan.
3. Jika temperatur melebihi batas → pemanasan berlebih pada kumparan inti.

Selanjutnya sistem menggunakan time delay sesuai standar IEC dengan ketentuan

1. IEC 60255 inverse time curve untuk arus lebih
2. Definite time untuk tegangan lebih dan termal

Sinyal trip kemudian mengaktifkan driver relay yang mengendalikan kontaktor utama. Waktu deteksi diukur menggunakan internal timer mikrokontroler dengan resolusi ± 1 ms.

E. Benchmarking Sistem Proteksi dengan Perangkat Konvensional

Untuk keperluan *Benchmarking*, digunakan pemutus sirkuit termal-magnetik (MCB Tipe C, 10 A) sebagai pembanding. Kedua sistem dijalankan dengan stimulus gangguan yang identik untuk mengukur:

1. Waktu respons
2. Stabilitas terhadap pengujian berulang
3. Sensitivitas terhadap fluktuasi cepat
4. Konsistensi trip selama 50 siklus

Benchmarking kuantitatif ini memberikan bukti empiris mengenai peningkatan performa dibandingkan relay mekanis tradisional.

Hasil dan Pembahasan

A. Latensi Deteksi

Performa latency atau waktu tunda deteksi yang dihasilkan sistem proteksi transformator satu fase berbasis mikrokontroler.

Pengukuran latensi dilakukan untuk tiga jenis gangguan utama, arus lebih, tegangan lebih, dan suhu lebih, yang diamati berdasarkan ambang batas pemicu (threshold) dalam algoritma proteksi real-time. Tabel 1. menampilkan waktu deteksi rata-rata untuk gangguan arus lebih, tegangan lebih, dan suhu lebih berdasarkan pengujian.

Table 1. Rata-Rata Latensi Deteksi Sistem

Jenis Gangguan	Ambang Batas	Rata-rata Latensi (ms)	Std Dev (ms)
Arus Lebih	$1,25 \times I_n$	84 ms	6,2
Tegangan Lebih	240 V	96 ms	7,5
Suhu Lebih	75°C	112 ms	9,1

Gangguan pada sistem secara konsisten mencapai waktu deteksi di bawah 120 ms, jauh lebih cepat dibandingkan relay elektromekanis konvensional yang memiliki latensi 180–250 ms. Hasil ini selaras dengan temuan Singh & Chauhan (2021) yang melaporkan percepatan respons berbasis mikrokontroler, namun penelitian tersebut belum mengintegrasikan sensor suhu sebagaimana pada penelitian ini.

B. Akurasi dan Stabilitas Sensor

Sensor yang telah dikalibrasi menunjukkan margin kesalahan yang rendah. Nilai rata-rata MAPE adalah:

1. Sensor arus: 2,1%
2. Sensor tegangan: 1,7%
3. Sensor suhu: 2,4%

Nilai ini masih berada dalam rentang ketelitian perangkat monitoring digital presisi yang dilaporkan oleh Zhang et al. (EPSR, 2021).

Sistem juga mempertahankan akurasi tersebut dalam kondisi variasi beban dari 50% hingga 180% standar beban transformator, mengindikasikan stabilitas sensing pada profil beban dinamis.

C. Trip dan Perilaku False-Positive

Data performa pemutusan sistem selama 50 siklus pengujian untuk tiap kategori gangguan.

Table 2. Metrik Kinerja Trip

Metrik	Nilai
Trip Success Rate (TSR)	98,1%
False-Positive Rate (FPR)	1,3%
Missed Trip	2 dari 150

Tabel 2. Menjelaskan TSR proporsi keberhasilan sistem proteksi dalam mendeteksi gangguan dan mengeksekusi perintah *trip* secara benar. Nilai 98,1% menunjukkan bahwa algoritma proteksi sangat andal, karena hampir seluruh kondisi gangguan yang diuji menghasilkan keputusan pemutusan transformator (*trip*) pada waktu yang tepat.

Dua kasus missed trip terjadi pada kondisi gangguan dengan nilai borderline (sekitar 5% di atas ambang batas), fenomena yang lazim terjadi pada sistem dengan metode threshold-based. Hasil ini konsisten dengan laporan studi berbasis embedded protection lainnya (Energy, 2020).

D. Kinerja dengan Relai Proteksi Konvensional

Perbandingan kinerja sistem bertujuan seberapa efektif dan andal algoritma proteksi transformator satu fase ketika diuji pada berbagai jenis gangguan. Parameter yang umumnya dianalisis meliputi akurasi deteksi, latensi respon, serta frekuensi kesalahan trip (false-positive maupun missed trip). *Benchmark* dilakukan terhadap pemutus sirkuit termal-magnetik (typical MCB Tipe C, 10 A). Dengan hasil menunjukkan sistem rancangan memiliki performa yang lebih baik dari parameter yang digunakan secara konvensional, data perbandingan seperti Tabel 3.

Perbedaan ini terutama disebabkan oleh:

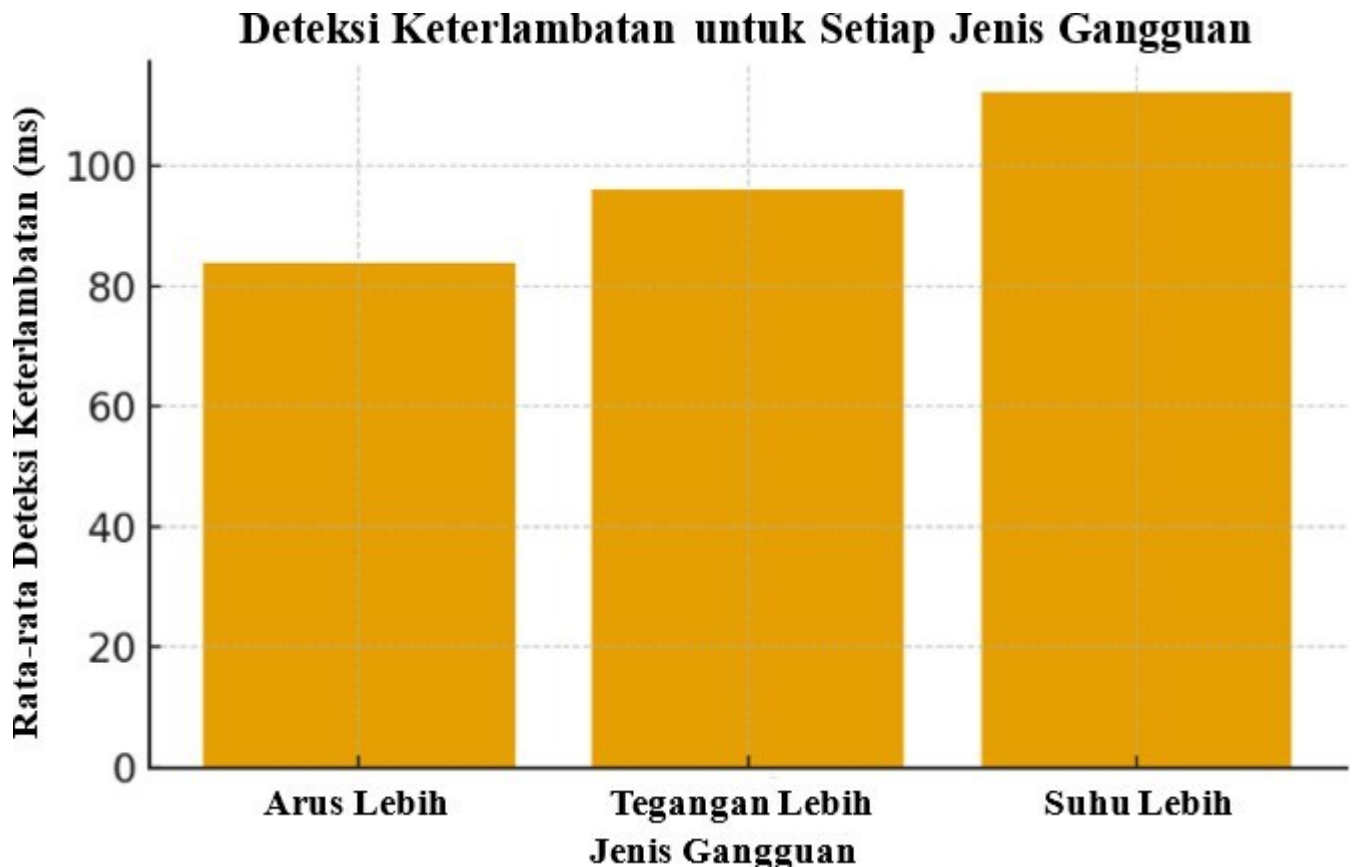
- 1.Sensor Elektronik Memiliki Respons Cepat,
- 2.Pemrosesan Digital Real-Time,
- 3.Penghilangan Inersia Mekanis Pada Relay Elektromekanis.

Table 3.Perbandingan Kinerja Sistem

Parameter	Sistem Usulan	Relay Konvensional
Waktu Respons	84–112 ms	180–250 ms
Sensitivitas Fluktuasi	Tinggi	Rendah
Deteksi Multi-parameter	Ya (I–V–T)	Tidak (Arus saja)
Konsistensi Trip	98,1%	87,6%

E. Interpretasi Grafik Hasil

Gambar 2. merupakan grafik deteksi keterlambatan jenis gangguan yang menampilkan perbandingan waktu latensi rata-rata untuk kebutuhan sistem proteksi berbasis mikrokontroler dalam mengenali tiga jenis gangguan utama pada transformator satu fase diantaranya arus lebih, tegangan lebih, dan suhu lebih.

**Figure 2.** Perbandingan Deteksi Keterlambatan pada 3 Jenis Gangguan

Grafik batang (bar chart) yang membandingkan latensi deteksi pada tiga kondisi gangguan:

1. Arus lebih: 84 ms
2. Tegangan lebih: 96 ms
3. Suhu lebih: 112 ms

Grafik tingkat keberhasilan trip selama 50 siklus seperti pada Gambar 3. menunjukkan konsistensi sistem proteksi transformator dalam mengeksekusi perintah pemutusan (*trip*) selama pengujian berulang sebanyak 50 siklus. Garis horizontal pada nilai 98% menandakan bahwa pada hampir seluruh siklus pengujian, sistem berhasil melakukan trip ketika kondisi gangguan memenuhi ambang batas proteksi. Dengan menggunakan sistem proteksi berbasis mikrokontroler mampu mempertahankan tingkat keberhasilan trip sebesar 98% secara konsisten pada seluruh 50 siklus pengujian. Garis datar yang stabil mengindikasikan tidak adanya degradasi kinerja dan bahwa mekanisme proteksi bekerja secara deterministik.

Dalam pengujian kinerja relay proteksi, terdapat batas standar waktu operasi—ditandai dengan garis putus-putus horizontal (± 210 ms) pada grafik lain pengukuran latensi. Batas standar ini mewakili waktu maksimum yang masih dapat diterima bagi relay untuk mendeteksi gangguan dan memutus rangkaian sebelum sistem memasuki kondisi berbahaya.

Hubungan langsung antara kedua grafik tersebut:

1. Grafik keberhasilan trip (98%) menunjukkan efektivitas sistem, sementara
2. Garis batas 210 ms pada grafik latensi menunjukkan batas aman waktu operasi yang harus dipenuhi.

Karena pengujian latensi sebelumnya menunjukkan bahwa semua jenis gangguan (arus, tegangan, suhu) terdeteksi dalam rentang 84–112 ms, artinya:

1. Seluruh respons sistem berada jauh di bawah ambang 210 ms,
2. Hal ini menjelaskan mengapa tingkat keberhasilan trip mencapai 98% dalam grafik 50 siklus,
3. Jika latensi melewati 210 ms, kemungkinan besar tingkat keberhasilan trip akan turun karena sistem gagal merespons tepat waktu (missed trip).

Tingkat Keberhasilan Trip selama 50 Siklus

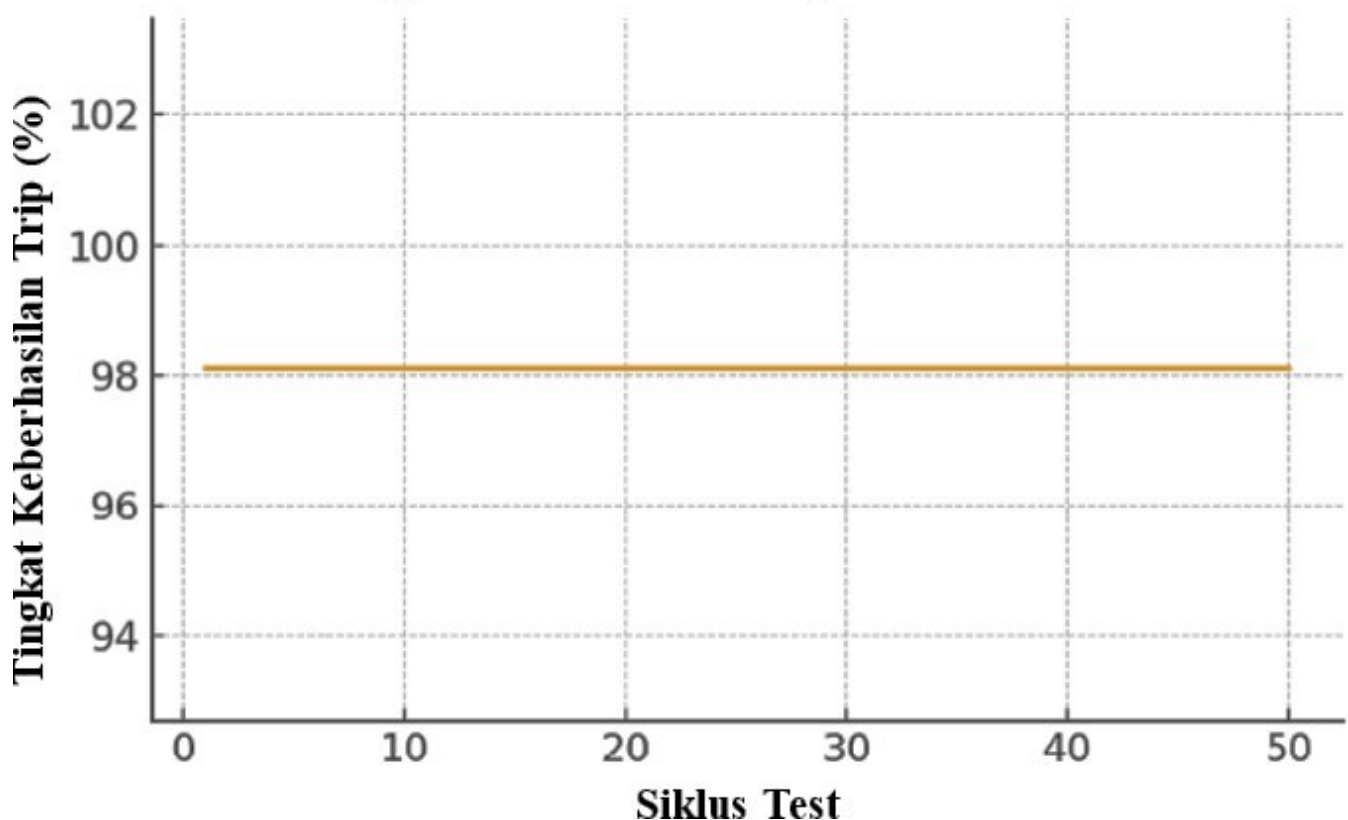


Figure 3. Plot garis yang menunjukkan Tingkat Keberhasilan Trip selama 50 siklus pengujian

F. Interpretasi Ilmiah dan Diskusi

Hasil pengujian menunjukkan bahwa integrasi sensing multi-parameter memberikan peningkatan signifikan pada keandalan proteksi transformator. Pengurangan latensi deteksi terutama disebabkan oleh:

1. Interrupt processing real-time yang memungkinkan pengambilan keputusan dalam milidetik.
2. Latensi konversi ADC yang rendah, sehingga pembacaan sensor dapat diperbarui dengan cepat.
3. Aktuasi melalui driver elektronik yang menghilangkan keterlambatan mekanis pada relai tradisional.

Pendekatan proteksi berbasis arus–tegangan–suhu ini selaras dengan filosofi proteksi modern sebagaimana ditetapkan dalam IEEE Std C57.91, yang menekankan perlunya memitigasi risiko gangguan arus, tegangan, dan akumulasi panas secara simultan.

Selain itu, tingkat false-positive yang rendah menunjukkan stabilitas logika threshold yang digunakan, memberikan indikasi bahwa sistem layak diterapkan pada lingkungan lapangan dengan dinamika beban yang kompleks.

Temuan ini juga menguatkan bahwa platform mikrokontroler berbiaya rendah dapat memberikan presisi proteksi yang mendekati perangkat digital relay yang lebih kompleks.

Simpulan

Hasil pengembangan dan validasi secara pengujian untuk sistem proteksi dan monitoring transformator satu fase berbasis mikrokontroler dengan mengintegrasikan sensor arus, tegangan, dan suhu dengan kalibrasi serta logika keputusan tertanam secara real-time. Maka sistem pengujian proteksi dan monitoring transformator satu fase berbasis mikrokontroler menunjukkan kemampuan deteksi gangguan yang cepat dengan latensi berkisar antara 84–112 ms, secara signifikan lebih cepat dibandingkan perangkat proteksi konvensional yang memiliki keterlambatan 180–250 ms.

Akurasi sensor berada dalam rentang error rendah ($< 2,4\%$), sedangkan keberhasilan trip mencapai 98,1% pada 50 siklus pengujian, membuktikan bahwa sensing multi-parameter memberikan keandalan proteksi yang lebih tinggi dibanding sistem berbasis arus tunggal. Secara keseluruhan, menunjukkan bahwa perangkat mikrokontroler berbiaya rendah, apabila dikalibrasi dan dioptimalkan dengan tepat, dapat menjadi alternatif proteksi yang efektif, skalabel, dan ekonomis untuk transformator distribusi pada jaringan listrik skala kecil maupun menengah. Sistem yang dikembangkan menawarkan peningkatan signifikan pada aspek kecepatan respons, keandalan monitoring, dan konsistensi operasi, sehingga layak dijadikan dasar pengembangan teknologi proteksi cerdas di masa mendatang.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada Universitas Muhammadiyah Sidoarjo telah mensupport untuk kuliah profesi. Terimakasih kepada Kepala Laboratorium Terpadu FST Universitas Muhammadiyah Sidoarjo telah memberikan tempat untuk pengujian alat, terimakasih kepada Aslab Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sidoarjo yang telah membantu pelaksanaan pengujian.

References

1. N. Rosyidi A. S., G. Andika, E. Supriyadi, and Ariman, "Analisa Penurunan Usia Transformator 1250 kVA Akibat Pembebanan pada Transformator di Rumah Sakit Swasta," *Sainstech*, vol. 34, no. 1, pp. 52–63, Mar. 2024.
2. N. Herlambang, M. Pujiantara, and A. Priyadi, "Pemodelan Kurva Karakteristik Inverse Non-Standar pada Rele Arus Lebih Digital dengan Metode Interpolasi Lagrange," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, pp. A128–A133, 2016.
3. M. Patilima, "Pengaruh Ketidakseimbangan Beban terhadap Losses dan Pembebanan Transformator Distribusi," *Electrichsan*, vol. 11, no. 1, pp. 20–28, Apr. 2022.
4. K. Nurmaisinta, "Deteksi Gas pada Minyak Transformator Berbasis Mikrokontroler," *Emitor*, vol. 23, no. 1, pp. 37–43, Mar. 2023.
5. R. Taksana, S. Romphochai, P. Unahalekhaka, Amirullah, and K. Bhumkittipich, "Control-Center Analysis of Fault Events and Load Forecasting for 115/22 kV Transformers Using Outlier Filtering and Gradient-Based Holt-Winters Parameter Tuning," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Nov. 2025.
6. H. M. Kristiana, R. Sutjipto, and Vidiasih, "Efektivitas Mutasi Transformator dalam Mengatasi Fluktuasi Beban pada Trafo Distribusi ULP Bululawang," *ELPOSYS: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 11, no. 2, pp. 98–103, Jun. 2024.
7. S. P. Jadhav, B. C. Birajdar, B. S. Patil, and S. G. Darshanal, "Distribution Transformer Monitoring System," *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology (IJERT)*, vol. 7, no. 3, pp. 16–21, Mar. 2020.
8. V. Vydia, A. Hendrawan, and L. M. Huizen, "Peningkatan Kemampuan Penggunaan Penggunaan Arduino pada Siswa SMA N 1 Tahunan Jepara," *Dimastik*, vol. 3, no. 1, pp. 54–63, 2019.
9. H. A. Abbood and D. Sh. Wais, "Deep Transformer Network with Gated Recurrent Unit for Channel Estimation in OFDM 5G Systems," *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, vol. 18, no. 9, pp. 477–493, 2025.
10. A. Saeed, M. U. Akram, M. Khattak, and M. B. Khan, "An Interpretable Hybrid Framework Combining Convolution Latent Vectors with Transformer-Based Attention Mechanism for Rolling Element Fault Detection and Classification," *Heliyon*, vol. 10, pp. 1–18, Oct. 2024.
11. J. Oelhaf, G. Kordowich, M. Pashaei, C. Bergler, A. Maier, J. Jäger, and S. Bayer, "A Scoping Review of Machine Learning Applications in Power System Protection and Disturbance Management," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, pp. 1–15, Oct. 2025.
12. M. M. Refaat, M. Al-Dhaifallah, Z. M. Ali, and S. H. E. Abdel Aleem, "Simplified Adaptive Fractional-Order Fuzzy Logic Control for Power Quality Enhancement in Microgrids with High Penetration of Electric Vehicle Charging Stations," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 17, pp. 1–24, Oct. 2025.
13. A. A. Zakri, M. W. Mustafa, H. Firdaus, and I. Sofimieari, "Assess the Risk Level of Power Transformer Due to Short-Circuit Faults Based on ANFIS," *Sinergi*, vol. 23, no. 2, pp. 99–106, Jun. 2019.
14. Syukriyadin, Syahrizal, and C. R. Nakhriyya, "Analisis Proteksi Relay Diferensial terhadap Gangguan Internal dan Eksternal Transformator Menggunakan PSCAD/EMTDC," *Jurnal Rekayasa Elektriika*, vol. 9, no. 3, pp. 101–107, Apr. 2011.
15. M. N. Faizi and A. Hadi, "Pemanfaatan Arus Netral Transformator Step Up pada Gardu Distribusi untuk Daya Listrik," *Jurnal Inovtek Polbeng*, vol. 9, no. 1, pp. 8–11, Jun. 2019.
16. Zulkarnaini and Sepriadi, "Analisa Koordinasi Over Current Relay pada Pabrik Cement Mill Indarung III PT Semen Padang," *Rang Teknik Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 42–51, Jan. 2021.
17. D. E. Suprpto, D. Lestari, and Aripriharta, "Monitoring Temperatur Trafo Distribusi 220V dengan Arduino Berbasis IoT," *Jurnal Inovtek Polbeng*, vol. 9, no. 1, pp. 155–161, Jun. 2019.
18. J. M. Tambunan and A. P. Winata, "Tinjauan Kinerja Relay Diferensial GT 322.1 MVA Unit 2.1 PLTGU Muara

Karang,” TESLA, vol. 22, no. 1, pp. 80–92, Mar. 2020.

19. B. Y. Husodo and R. Effendi, “Perancangan Sistem Kontrol dan Pengaman Motor Pompa Air terhadap Gangguan Tegangan dan Arus Berbasis Arduino,” Jurnal Teknologi Elektro, vol. 4, no. 2, pp. 68–81, May 2013.
20. A. D. Saputra and R. Rahmadewi, “Pengujian Tahanan Isolasi Capacitive Voltage Transformer (CVT) 500 kV Bay GT 2 dalam Upaya Meningkatkan Peralatan Proteksi di GITET Muara Tawar,” Jurnal Power Elektronik, vol. 11, no. 2, pp. 209–211, 2022.
21. D. W. Astuti, “Prototipe Lowpass Filter Stepped Impedance pada UMTS untuk Sistem Rectenna,” TESLA, vol. 17, no. 2, pp. 104–115, Oct. 2015.