

Design and Development of an Arduino-Based Automatic Protection System Against Phase Loss and Phase Imbalance in a Hoist Machine [Rancang Bangun Sistem Proteksi Otomatis terhadap Kehilangan Fasa dan Ketidakseimbangan Fasa pada Mesin Hoist Berbasis Arduino]

Rachmad Aditya Pratama¹⁾, Arief Wisaksono²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

²⁾ Program Studi Teknik Elektro, Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

Email Penulis Korespondensi: ariefwisaksono@umsida.ac.id

Abstract. Load-lifting hoist machines are widely used in industrial settings and are typically driven by three-phase electric motors. These motors rely heavily on a stable voltage supply. disturbances such as phase loss and voltage imbalance can lead to performance degradation or even motor damage. This research aims to design an Arduino-based automatic protection system to detect such disturbances in real-time. The system utilizes PZEM modules as voltage sensors for each phase. Upon detecting a fault, the system cuts off the power supply using a relay. The resulting design is expected to enhance the safety and operational reliability of hoist machines in industrial environments.

Keywords - Hoist machine; three-phase motor; phase loss; phase imbalance; Arduino.

Abstrak. Mesin hoist pengangkat beban banyak digunakan di lingkungan industri dan umumnya digerakkan oleh motor listrik tiga fasa. Motor jenis ini sangat bergantung pada kestabilan suplai tegangan. Gangguan seperti kehilangan fasa dan ketidakseimbangan tegangan dapat menyebabkan penurunan kinerja hingga kerusakan motor. Penelitian ini bertujuan merancang sistem proteksi otomatis berbasis Arduino untuk mendeteksi gangguan tersebut secara real-time. Sistem menggunakan modul PZEM sebagai sensor tegangan pada masing-masing fasa. Apabila terdeteksi gangguan, sistem akan memutus suplai listrik menggunakan relay. Hasil perancangan diharapkan dapat meningkatkan keamanan dan keandalan operasi mesin hoist di lingkungan industri.

Kata Kunci - Mesin hoist; motor tiga fasa; kehilangan fasa; ketidakseimbangan fasa; Arduino.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan industri menuntut sistem pengangkutan material yang efisien, cepat, dan aman. Mesin hoist merupakan salah satu peralatan penting dalam proses tersebut dan umumnya digerakkan oleh motor listrik tiga fasa karena kemampuannya menghasilkan tenaga besar dan stabil. Namun, kinerja motor tiga fasa sangat bergantung pada kestabilan suplai tegangan dari ketiga fasanya.

Dalam kondisi operasional nyata, sering terjadi gangguan kelistrikan berupa kehilangan fasa dan ketidakseimbangan tegangan. Kehilangan fasa dapat disebabkan oleh kabel yang putus atau longgar, kerusakan MCB atau kontaktor, gangguan jaringan distribusi, beban berlebih, serta masalah mekanis pada hoist seperti kerusakan brush connector dan rel connector. Sementara itu, ketidakseimbangan fasa umumnya dipicu oleh pembagian beban yang tidak merata atau kualitas suplai listrik yang buruk [1].

Gangguan-gangguan tersebut dapat menyebabkan overheating, getaran berlebih, penurunan performa, hingga kerusakan permanen pada motor hoist. Risiko semakin meningkat karena mesin hoist di industri biasanya beroperasi secara terus menerus untuk memenuhi target produksi. Selain merusak peralatan, kondisi ini juga membahayakan keselamatan operator. Sistem proteksi konvensional seperti MCB dan thermal overload relay belum mampu mendeteksi gangguan fasa secara cepat dan akurat, sehingga diperlukan sistem proteksi tambahan berbasis mikrokontroler yang bekerja secara real-time [2] [3].

II. METODE

Penelitian ini menggunakan metode Research and Development (R&D) yang bertujuan untuk merancang, mengembangkan, dan menguji sistem proteksi otomatis pada mesin hoist berbasis motor listrik tiga fasa. Metode ini dipilih karena sesuai untuk menghasilkan produk sistem proteksi yang dapat diuji secara teknis dan fungsional. Tahapan penelitian meliputi analisis kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, pembuatan prototipe, serta pengujian kinerja sistem [4].

Perancangan sistem didasarkan pada prinsip kerja motor listrik tiga fasa yang memerlukan suplai tegangan seimbang agar dapat beroperasi secara optimal. Kehilangan fasa menyebabkan motor bekerja dalam kondisi tidak normal akibat peningkatan arus pada fasa yang tersisa, sedangkan ketidakseimbangan tegangan antar fasa dapat

Copyright © Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. This preprint is protected by copyright held by Universitas Muhammadiyah Sidoarjo and is distributed under the Creative Commons Attribution License (CC BY). Users may share, distribute, or reproduce the work as long as the original author(s) and copyright holder are credited, and the preprint server is cited per academic standards.

Authors retain the right to publish their work in academic journals where copyright remains with them. Any use, distribution, or reproduction that does not comply with these terms is not permitted.

menurunkan efisiensi motor dan mempercepat terjadinya panas berlebih serta getaran. Oleh karena itu, pemantauan tegangan pada setiap fasa digunakan sebagai dasar dalam sistem proteksi yang dikembangkan [5].

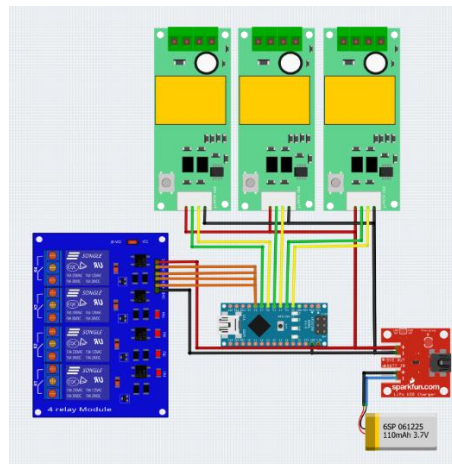
Sistem proteksi dirancang menggunakan mikrokontroler Arduino Nano sebagai pengendali utama yang berfungsi mengolah data dan mengambil keputusan proteksi. Pengukuran tegangan dilakukan menggunakan modul PZEM yang dipasang pada masing-masing jalur fasa listrik tiga fasa. Data tegangan yang terbaca diproses secara real-time dan dibandingkan dengan nilai ambang batas yang telah ditentukan. Apabila salah satu fasa terdeteksi memiliki tegangan mendekati nol volt atau terdapat selisih tegangan antar fasa yang melebihi batas toleransi, sistem akan mengidentifikasi kondisi tersebut sebagai gangguan [6] [7].

Sebagai respon terhadap gangguan, Arduino Nano akan mengaktifkan relay untuk memutus suplai listrik ke mesin hoist dan mengaktifkan buzzer sebagai indikator peringatan kepada operator. Pengujian sistem dilakukan dengan mensimulasikan kondisi tegangan normal, kehilangan salah satu fasa, dan ketidakseimbangan tegangan pada model kerja mesin hoist berskala kecil. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi gangguan dan memberikan respon proteksi secara cepat dan andal [8].

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pengujian Sistem

Hasil penelitian ini adalah terealisasinya prototipe sistem proteksi otomatis terhadap kehilangan fasa dan ketidakseimbangan tegangan pada mesin hoist berbasis Arduino Nano. Sistem yang dikembangkan terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu rangkaian sumber tegangan listrik tiga fasa, tiga unit modul PZEM-004T sebagai sensor pengukur tegangan pada masing-masing fasa, Arduino Nano sebagai unit pemroses dan pengendali, modul relay sebagai aktuator pemutus suplai listrik ke motor hoist. Skema koneksi antar komponen pada prototipe sistem ditunjukkan pada Gambar 1 berupa wiring diagram hasil perancangan.



Gambar 1. Wiring Diagram

Pada wiring diagram tersebut, jalur fasa R, S, dan T dari sumber listrik dihubungkan ke terminal input tegangan pada masing-masing modul PZEM-004T. Setiap modul sensor terhubung ke Arduino Nano melalui komunikasi serial (TX-RX) sehingga data tegangan tiap fasa dapat dibaca secara terpisah dan kontinu. Output kendali dari Arduino Nano dihubungkan ke modul relay 5 volt yang berfungsi sebagai saklar elektronik untuk memutus atau menghubungkan kembali suplai listrik ke mesin hoist. Integrasi rangkaian sesuai wiring diagram ini memungkinkan sistem melakukan pemantauan kondisi tegangan tiga fasa secara real-time dan memberikan respon proteksi secara otomatis tanpa intervensi operator.

Pengujian sistem proteksi otomatis dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan alat dalam mendeteksi kondisi normal, kehilangan fasa (*phase loss*), dan ketidakseimbangan tegangan (*voltage unbalance*) pada mesin hoist tiga fasa. Pada sistem ini, modul PZEM-004T digunakan sebagai sensor tegangan yang dipasang pada masing-masing fasa, yaitu fasa R, S, dan T. Data tegangan yang terukur kemudian dikirim ke Arduino Nano untuk diproses secara *real-time* sebagai dasar pengambilan keputusan sistem proteksi.

Sebelum dilakukan pengujian fungsi proteksi, terlebih dahulu dilakukan pengujian akurasi sensor PZEM-004T dengan membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap hasil pengukuran menggunakan avometer digital sebagai alat ukur referensi. Pengujian dilakukan pada tiga variasi tegangan input, yaitu 220 V, 200 V, dan 100 V. Setiap fasa diuji sebanyak lima kali untuk mengetahui tingkat konsistensi dan akurasi pembacaan sensor. Hasil pengujian sensor PZEM-004T pada tegangan input 220 V ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Pengujian Sensor PZEM Dan Nilai Error Dengan Input 220Volt

Fasa	Tegangan Input	Hasil Pengujian Sensor	Hasil Pengukuran Avo	Error %
R	220	231,20	230	0,52 %
		230,60	230	0,26 %
		230,40	230	0,17 %
		230,00	230	0,00 %
		228,30	228	0,13 %
S	220	233,50	232	0,65 %
		232,50	232	0,22 %
		232,10	232	0,04 %
		231,90	231	0,39 %
		232,70	232	0,30 %
T	220	229,30	229	0,13 %
		229,50	229	0,22 %
		229,70	229	0,31 %
		230,10	230	0,04 %
		231,10	230	0,48 %

Berdasarkan Tabel 1, nilai error pembacaan sensor pada fasa R berada pada rentang 0,00% hingga 0,52%, dengan rata-rata error sebesar 0,22%. Pada fasa S diperoleh error antara 0,04% hingga 0,65% dengan rata-rata sebesar 0,32%, sedangkan pada fasa T error berada pada rentang 0,04% hingga 0,48% dengan rata-rata sebesar 0,24%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang baik dalam melakukan pengukuran tegangan pada kisaran 220 V.

Selanjutnya dilakukan pengujian sensor pada tegangan input 200 V sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Sensor PZEM Dan Nilai Error Dengan Input 200Volt

Fasa	Tegangan Input	Hasil Pengujian Sensor	Hasil Pengukuran Avo	Error %
R	200	200,50	200	0,25 %
		200,80	200	0,40 %
		201,10	200	0,55 %
		200,60	200	0,30 %
		200,60	200	0,30 %
S	200	200,40	200	0,20 %
		200,60	200	0,30 %
		200,30	200	0,15 %
		200,40	200	0,20 %
		200,50	200	0,25 %
T	200	200,60	200	0,30 %
		200,60	200	0,30 %
		201,10	200	0,55 %
		200,70	200	0,35 %
		200,90	200	0,45 %

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 2, nilai error pembacaan sensor untuk fasa R berada pada rentang 0,25% hingga 0,55% dengan rata-rata sebesar 0,36%. Pada fasa S diperoleh error antara 0,15% hingga 0,30% dengan rata-rata sebesar 0,22%, sedangkan pada fasa T nilai error berada pada rentang 0,30% hingga 0,55% dengan rata-rata sebesar 0,39%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor tetap mampu memberikan pembacaan yang stabil dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil pada tegangan 200 V.

Pengujian berikutnya dilakukan pada tegangan input 100 V untuk mengetahui performa sensor pada level tegangan yang lebih rendah. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sensor PZEM Dan Nilai Error Dengan Input 100Volt

Fasa	Tegangan Input	Hasil Pengujian Sensor	Hasil Pengukuran Avo	Error %
R	100	100,20	100	0,20 %
		100,30	100	0,30 %
		100,30	100	0,30 %
		100,20	100	0,20 %
		100,10	100	0,10 %
S	100	100,70	100	0,70 %
		100,60	100	0,60 %
		100,50	100	0,50 %
		100,50	100	0,50 %
		100,70	100	0,70 %
T	100	100,20	100	0,20 %
		100,40	100	0,40 %
		100,40	100	0,40 %
		100,50	100	0,50 %
		100,30	100	0,30 %

Berdasarkan Tabel 3, nilai error pada fasa R berada pada rentang 0,10% hingga 0,30% dengan rata-rata sebesar 0,22%. Pada fasa S diperoleh error antara 0,50% hingga 0,70% dengan rata-rata sebesar 0,60%, sedangkan pada fasa T nilai error berada pada rentang 0,20% hingga 0,50% dengan rata-rata sebesar 0,36%. Meskipun terjadi peningkatan error pada beberapa pengukuran, seluruh nilai kesalahan masih berada di bawah 1%, sehingga sensor PZEM-004T tetap layak digunakan sebagai sensor tegangan dalam sistem proteksi otomatis yang dirancang.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor PZEM-004T memiliki tingkat akurasi yang baik dengan nilai error rata-rata di bawah 1% pada seluruh variasi tegangan pengujian. Dengan demikian, sensor mampu memberikan data tegangan yang cukup akurat dan andal untuk digunakan sebagai masukan pada sistem proteksi kehilangan fasa dan ketidakseimbangan tegangan berbasis Arduino Nano.

Pengujian selanjutnya dilakukan dengan mensimulasikan kondisi kehilangan salah satu fasa. Kehilangan fasa dilakukan secara bergantian pada fasa R, S, dan T dengan memutus suplai pada masing-masing fasa. Hasil pengujian kehilangan fasa ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kondisi Hilang Fasa

Kondisi	Fasa R (V)	Fasa S (V)	Fasa T (V)	Relay
Hilang Fasa R	0	234,0	231,70	Off
	0	233,60	232,30	Off
	0	232,30	231,80	Off
Hilang Fasa S	230,20	0	232,00	Off
	228,80	0	232,70	Off
	228,40	0	233,10	Off
Hilang Fasa T	229,20	237,30	0	Off
	228,70	237,60	0	Off
	229,10	235,70	0	Off

Pada setiap kondisi kehilangan fasa, sensor PZEM mampu menunjukkan bahwa tegangan pada fasa yang diputus turun hingga nol volt. Arduino Nano berhasil mengidentifikasi kondisi tersebut sebagai gangguan dan memberikan respon proteksi.

Pengujian ketidakseimbangan fasa dilakukan dengan memberikan perbedaan tegangan yang tidak merata pada salah satu jalur fasa. Parameter ketidakseimbangan dihitung berdasarkan persentase deviasi maksimum terhadap tegangan rata-rata. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Ketidakseimbangan Tegangan Antar Fasa

Kondisi	Fasa R (V)	Fasa S (V)	Fasa T (V)	Relay
Tidak seimbang $\leq 2\%$	231,10	240,80	238,90	On
	245,20	240,80	237,60	On
	236,10	227,20	237,40	On
	236,10	243,10	236,50	On
	236,70	240,80	231,10	On
	236,80	239,60	244,90	On
Tidak Seimbang $> 2\% - 5\%$	222,20	240,50	236,10	On
	255,30	240,70	235,80	On
	236,20	221,80	237,60	On
	236,40	251,30	235,80	On
	236,30	240,20	222,30	On
	236,40	239,50	255,20	On
Tidak Seimbang $> 5\%$	210,80	238,30	227,30	Off
	245,60	237,80	228,20	Off
	229,40	209,90	227,60	Off
	229,30	246,80	228,30	Off
	232,10	237,40	212,80	Off
	232,00	238,30	155,50	Off

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 5, sistem mampu membedakan tingkat ketidakseimbangan tegangan berdasarkan nilai tegangan yang terukur pada masing-masing fasa. Pada kondisi ketidakseimbangan rendah dan sedang, relay tetap berada pada kondisi On karena nilai ketidakseimbangan masih berada dalam batas toleransi yang telah ditetapkan. Sebaliknya, ketika tingkat ketidakseimbangan melebihi 5%, relay berada pada kondisi Off sebagai bentuk respon proteksi untuk mencegah motor beroperasi pada kondisi yang berpotensi menimbulkan kerusakan.

B. Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1 hingga Tabel 3, sensor PZEM-004T menunjukkan tingkat akurasi yang baik pada berbagai variasi tegangan masukan. Nilai error rata-rata pada seluruh pengujian berada di bawah 1%, yang menunjukkan bahwa sensor mampu memberikan data tegangan yang akurat dan konsisten. Tingkat akurasi tersebut menunjukkan bahwa sensor layak digunakan sebagai sumber data utama dalam sistem proteksi kehilangan fasa dan ketidakseimbangan tegangan.

Hasil pengujian kehilangan fasa pada Tabel 4 menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi gangguan ketika salah satu fasa mengalami penurunan tegangan hingga 0 V. Pada seluruh skenario pengujian, relay secara otomatis berubah ke kondisi Off sebagai respon proteksi. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma deteksi kehilangan fasa yang diterapkan pada Arduino Nano bekerja sesuai dengan rancangan. Kemampuan mendeteksi kehilangan fasa sangat penting karena gangguan tersebut dapat menyebabkan peningkatan arus pada fasa yang masih aktif, kenaikan temperatur lilitan motor, penurunan torsi, serta mempercepat kerusakan motor induksi tiga fasa.

Pada pengujian ketidakseimbangan tegangan antar fasa dalam Tabel 5, sistem memperlihatkan kemampuan mendeteksi tingkat deviasi tegangan dengan baik. Ketidakseimbangan tegangan dihitung menggunakan persamaan (1):

$$Unbalance(\%) = \frac{|V_{max} - V_{rata-rata}|}{V_{rata-rata}} \times 100\% \quad (1)$$

Berdasarkan hasil perhitungan, sistem tidak memberikan respon proteksi pada kondisi ketidakseimbangan hingga 5% karena masih berada dalam batas toleransi yang ditentukan. Namun, ketika nilai ketidakseimbangan melebihi 5%, sistem secara otomatis mengaktifkan mekanisme proteksi dengan memutus relay. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pemantauan tegangan secara real-time dan mengambil keputusan proteksi secara otomatis berdasarkan parameter yang telah ditetapkan.

Mesin hoist pada lingkungan industri umumnya beroperasi secara terus-menerus untuk mendukung proses produksi. Kondisi operasi yang berkelanjutan menyebabkan motor penggerak rentan terhadap gangguan kehilangan fasa maupun ketidakseimbangan tegangan. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sistem proteksi berbasis Arduino Nano dan sensor PZEM-004T mampu mendeteksi kedua jenis gangguan tersebut dengan baik serta memberikan respon proteksi secara otomatis. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dapat meningkatkan keandalan operasi hoist, mengurangi risiko kerusakan peralatan, dan mendukung aspek keselamatan kerja di lingkungan industri.

IV. KESIMPULAN

Sistem proteksi otomatis berbasis Arduino Nano yang telah dirancang bangun mampu mendeteksi kehilangan fasa dan ketidakseimbangan tegangan pada mesin hoist tiga fasa secara real-time. Batas toleransi ketidakseimbangan tegangan ditetapkan sebesar 5%, dan sistem memberikan respon otomatis berupa pemutusan suplai listrik menggunakan relay ketika nilai tersebut terlampaui. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat bekerja efektif, responsif, dan sesuai dengan kebutuhan proteksi motor induksi tiga fasa pada mesin hoist di lingkungan industri.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam pelaksanaan penelitian hingga penyusunan artikel ini. Terima kasih khusus disampaikan kepada dosen pembimbing dan dosen penguji atas arahan dan masukan yang diberikan. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, pihak Laboratorium Teknik Elektro GKB 6, keluarga, serta rekan-rekan yang telah memberikan dukungan selama penelitian. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan sistem proteksi motor listrik tiga fasa, khususnya pada mesin hoist.

REFERENSI

- [1] S. A. Nasar, *Electric Machines and Power Systems*, New York: McGraw-Hill, 2001.
- [2] A. Santoso, "Rancang Bangun Sistem Proteksi Motor Listrik Tiga Fasa Menggunakan Arduino Uno," *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 12, no. 2, pp. 45-52, 2019.
- [3] D. Kurniawan, *Panduan Praktis Menggunakan Arduino*, Yogyakarta: Andi, 2017.
- [4] Okpatrioka, "Research and Development (R & D) Penelitian yang Inovatif dalam Pendidikan," *Jurnal Pendidikan, Bahasa dan Budaya*, vol. 1, no. 1, pp. 86-100, 2023.
- [5] S. R. Budi Prijo Sembodo, "Studi Perencanaan Proteksi Motor Listrik 3 Fasa," *Wahana : Tridarma Perguruan Tinggi*, vol. 58, no. 1, 2012.
- [6] A. B. Alfi Syhari, "Monitoring dan Controlling Daya Berbasis Arduino Uno Menggunakan Sensor PZEM-004T," *Jurnal Energi Elektrik*, vol. 12, no. 1, 2023.
- [7] A. S. Jamaaluddin Jamaaluddin, "Rancang Bangun Pengaman Panel Distribusi Tenaga Listrik Di Lippo Plaza Sidoarjo Dari Kebakaran Berbasis Arduino Nano," *Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA*, vol. 1, no. 2, p. 61-68, 2021.
- [8] Y. P. N. A. M. M. Arief Wisaksono, "Design of Monitoring and Control of Energy Use in Multi-storey Buildings based on IoT," *Journal of Electrical and Electronic Engineering-UMSIDA*, vol. 4, no. 2, p. 128-135, 2020.

Conflict of Interest Statement:

The author declares that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.