Jurnal: Elektrika Borneo (JEB)
Vol. 12, No. 2, Oktober 2026, hlm. 158-163 p-ISSN 2443-0986
e-ISSN 2685-001X

IMPLEMENTASI KONTROLER PID BERBASIS *INTERNALLY TRIGGERED* TRIAC UNTUK PEREDAMAN ARUS *STARTING* PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA

Abdul Muis Prasetia[1], Linda Sartika[2], Ahmad Setiawan[3]

[1,2,4]*Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia*

[1]prasetia.electric@gmail.com

Abstract*—The modern industrial world demands efficient production equipment, in which three-phase induction motors serve as the most widely used primary drivers. The primary challenge in operating induction motors is the generation of an exceptionally high starting current surge, reaching 5 to 7 times the nominal current, which triggers a voltage drop across the distribution network. This research aims to design and implement a three-phase induction motor starting current control system using a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller based on an Internally Triggered TRIAC. The system integrates an AC dimmer module containing a Zero Crossing Detector (ZCD) and an Internally Triggered TRIAC (BTA16), a PZEM-004T digital current sensor for feedback, and an Arduino Uno microcontroller as the PID control algorithm processor. The test results indicate that the current sensor exhibits a very strong linearity with a coefficient of determination R^2 = 0,9999 and an average error rate of 1.75%. Overall system testing proves that the PID controller is capable of suppressing the 0.40 A starting current surge inherent in the Direct On Line (DOL) method. Optimal PID parameter tuning at Kp = 3, Ki = 0,1, and Kd = 0,02 yields a stable transient response with a delay time of 16.5 s, rise time of 31.5 s, peak time of 34.1 s, and settling time of 34.08 s, successfully achieving the nominal current setpoint of 0.30 A precisely without any current surge (0% maximum overshoot and 0% steady state error).

Keywords*—Three-Phase Induction Motor, Starting Current, PID Controller, Internally Triggered TRIAC, Zero Crossing Detector.

Intisari—Dunia industri modern menuntut ketersediaan peralatan produksi yang efisien, di mana motor induksi tiga fasa menjadi penggerak utama yang paling banyak digunakan. Kendala utama dalam pengoperasian motor induksi adalah timbulnya lonjakan arus asut (*starting current*) yang sangat tinggi, mencapai 5 hingga 7 kali lipat dari arus nominal, sehingga memicu jatuh tegangan (*voltage drop*) pada jaringan distribusi. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan sistem kendali arus *starting* motor induksi tiga fasa menggunakan kontroler *Proportional-Integral-Derivative* (PID) berbasis *Internally Triggered TRIAC*. Sistem ini mengintegrasikan modul *dimmer* AC yang memuat rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD) dan *Internally Triggered TRIAC* (BTA16), sensor arus digital PZEM-004T sebagai umpan balik (*feedback*), serta mikrokontroler Arduino Uno sebagai pemroses algoritma kendali PID. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor arus memiliki tingkat linieritas yang sangat tinggi dengan koefisien determinasi R^2 = 0,9999 dan tingkat *error* rata-rata sebesar 1,75%. Pengujian sistem secara keseluruhan membuktikan bahwa kontroler PID mampu meredam lonjakan arus *starting* sebesar 0,40 A pada metode *Direct On Line* (DOL). Penalaan parameter PID optimal pada nilai Kp = 3, Ki = 0,1, dan Kd = 0,02 mampu menghasilkan respon transien yang stabil dengan *delay time* 16,5 s, *rise time* 31,5 s, *peak time* 34,1 s, serta *settling time* 34,08 s, dan berhasil mencapai *setpoint* arus nominal sebesar 0,30 A secara presisi tanpa menimbulkan lonjakan arus (*maximum overshoot* 0% dan *steady state error* 0%).

***Kata Kunci*—Motor Induksi Tiga Fasa, Arus *Starting*, Kontroler PID, *Internally Triggered TRIAC*, *Zero Crossing Detector*.**

I. PENDAHULUAN

Kemajuan pesat di sektor perindustrian, baik pada skala besar maupun kecil, menuntut ketersediaan peralatan produksi yang andal dan tepat guna untuk meningkatkan efisiensi waktu serta menekan biaya operasional. Sebagian besar peralatan penggerak di lingkungan industri mengandalkan motor listrik arus bolak-balik (*Alternating Current* / AC), khususnya motor induksi. Motor induksi beroperasi berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, di mana arus pada rotor tidak disuplai dari sumber tegangan eksternal tertentu, melainkan terinduksi akibat adanya perbedaan kecepatan relatif (*slip*) antara putaran rotor dan medan magnet putar (*rotating magnetic field*) yang dibangkitkan oleh belitan stator [1], [2]. Dibandingkan dengan motor arus searah (*Direct Current* / DC), motor induksi memiliki konstruksi mekanis yang jauh lebih sederhana dan kokoh karena tidak adanya kontak fisik langsung antara stator dan rotor, sehingga mengeliminasi penggunaan komutator maupun sikat arang (*brush*) [3]. Keunggulan konstruksi ini menjadikan motor induksi lebih ekonomis, mudah dalam perawatan, serta dapat dihubungkan langsung pada sumber daya AC [3], [4]. Berkat karakteristik tersebut, penggunaan motor DC di industri mulai tergeser, dan diperkirakan sekitar 70% aplikasi penggerak industri seperti pompa, kompresor, *belt conveyor*, *grinder*, hingga sistem jaringan listrik—menggunakan motor induksi tiga fasa yang memiliki rentang kapasitas daya mulai dari 1/3 HP hingga ratusan HP [5], [6].

Meskipun memiliki keandalan operasional yang tinggi pada kondisi tunak (*steady-state*), motor induksi tiga fasa menghadapi kendala krusial pada saat proses pengasutan (*starting*), yakni fase akselerasi awal motor dari kecepatan nol menuju kecepatan putar nominalnya. Ketika tegangan penuh disuplai langsung ke belitan stator menggunakan metode konvensional *Direct On Line* (DOL), belitan

primer akan menarik lonjakan arus asut (*starting/inrush current*) yang sangat tinggi hingga mencapai 5 sampai 7 kali lipat dari arus nominalnya, sedangkan torsi awal yang dibangkitkan hanya berkisar antara 1,5 hingga 2,5 kali torsi beban penuh [7]–[9]. Meskipun berlangsung dalam durasi yang singkat, lonjakan arus transien yang ekstrem ini mengakibatkan jatuh tegangan (*voltage drop*) sesaat pada saluran daya dan berpotensi merusak atau mengganggu kinerja peralatan elektronik lain yang terhubung pada jaringan distribusi yang sama [7], [8], [10]. Oleh sebab itu, pada motor induksi berdaya besar (di atas 30 HP hingga 50 HP), pengasutan secara langsung sangat tidak direkomendasikan, sehingga diperlukan metode pengasutan alternatif seperti hubungan Star-Delta, *Variable Speed Drive* (VSD), maupun teknik *soft starting* guna membatasi lonjakan arus mula motor [5], [7], [8].

Berbagai pendekatan teknik pengasutan telah dikembangkan oleh para peneliti terdahulu untuk mereduksi arus *starting* dan mengoptimalkan kinerja transien motor induksi. Sultan dkk. [5] mengembangkan sistem pengasutan motor induksi tiga fasa berbasis *Programmable Logic Controller* (PLC) guna menekan arus mula serta menghindari jatuh tegangan sistem saat motor diasut. Di sisi lain, pemanfaatan komponen semikonduktor daya pada rangkaian *soft starting* juga banyak diterapkan untuk memodulasi tegangan masukan motor secara bertahap [7], [11]–[13]. Riyadi dkk. [7] merancang sistem soft *starting* pada motor induksi tiga fasa menggunakan enam buah komponen *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) yang disusun dalam konfigurasi konverter AC-AC anti-paralel. Melalui pengaturan waktu penyulutan pulsa gerbang (*gate trigger*) pada setiap setengah siklus tegangan sumber, tegangan masukan ke motor dapat dinaikkan secara halus dari nol hingga tegangan penuh selama periode pengasutan [7]. Pendekatan serupa dikaji oleh Bachtiar dkk. [13] yang merancang rangkaian *soft starting* motor induksi satu fasa menggunakan komponen TRIAC (*Triode for Alternating Current*) dan mikrokontroler Arduino. Dalam penelitian tersebut, Arduino difungsikan untuk mendeteksi persilangan titik nol (*Zero Crossing Detector* / ZCD) sebagai pemicu awal sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) guna mengontrol sudut penyulutan gerbang (gate) TRIAC, yang terbukti mampu menghemat arus pengasutan hingga 71,5% dengan batas arus tertinggi terjaga pada arus nominalnya [13].

Seiring perkembangan teknologi elektronika daya, pengaturan sudut fasa tegangan AC kini dapat dilakukan secara lebih terpadu menggunakan *Internally Triggered* TRIAC (ITT). Komponen ini mengintegrasikan *Diode Alternating Curren*t (DIAC) dan TRIAC dalam satu kesatuan saklar semikonduktor dua arah (*bidirectional thyristor*), di mana TRIAC akan memicu tegangan maju setelah sinyal melewati batas tegangan breakover pada DIAC untuk merespons sudut fasa sinusoidal antara terminal MT1 dan MT2 [14], [15]. Herlan dan Prabowo [15] menyatakan bahwa *Internally Triggered* TRIAC sangat efektif diaplikasikan sebagai saklar AC dan pengendali fasa pada kontrol motor AC, modulasi temperatur, maupun pengaturan iluminasi pencahayaan. Keandalan komponen ini juga telah dibuktikan oleh Sartika dkk. [16] dalam sistem pengaturan beban otomatis generator sinkron tiga fasa, di mana *Internally Triggered* TRIAC mampu menurunkan tegangan beban secara otomatis ketika arus melampaui *setpoint* (0,50 A) guna mencegah terjadinya beban lebih (*overload*).

Guna memastikan penyulutan *Internally Triggered* TRIAC mampu meredam arus transien pengasutan secara presisi dan stabil pada nilai referensi, diperlukan algoritma pengendali umpan balik (*closed-loop*) yang tangguh. Kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan sistem kendali berumpan balik yang paling luas digunakan di industri karena mengombinasikan tiga parameter kendali proporsional (Kp), integral (Ki), dan derivatif (Kd)—secara paralel sehingga mampu saling menutupi kelemahan masing-masing aksi kendali [17]–[20]. Dalam sistem loop tertutup, aksi proporsional dan integral berperan mempercepat waktu naik (*rise time*) serta mengeliminasi kesalahan keadaan tunak (*steady state error*), sedangkan aksi derivatif memberikan koreksi prediktif terhadap laju perubahan *error* untuk menambah redaman sistem dan mengurangi overshoot [17]. Meskipun penerapan kontroler PID untuk regulasi kecepatan motor induksi [18] serta penggunaan TRIAC konvensional pada motor satu fasa [13] telah dikaji sebelumnya, integrasi kontroler PID dengan modul dimmer berbasis *Internally Triggered* TRIAC untuk pengendalian arus *starting* pada motor induksi tiga fasa masih jarang dieksplorasi.

Berdasarkan latar belakang dan kajian pustaka di atas, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem kendali arus *starting* motor induksi tiga fasa menggunakan kontroler PID berbasis *Internally Triggered* TRIAC. Sistem yang diusulkan mengintegrasikan modul dimmer (yang memuat rangkaian ZCD dan *Internally Triggered* TRIAC BTA16), sensor arus digital PZEM-004T sebagai umpan balik pengukuran arus, serta mikrokontroler Arduino Uno sebagai pemroses algoritma PID [21], [22]. Kontribusi dan tujuan utama dari makalah ini adalah mengendalikan sudut penyulutan tegangan melalui *Internally Triggered* TRIAC secara otomatis agar lonjakan arus *starting* motor induksi tiga fasa dapat dihilangkan dan dikendalikan menuju nilai *setpoint* arus nominalnya (0,3 A), sekaligus menganalisis karakteristik respon transien sistem (meliputi *delay time, rise time, peak time, maximum overshoot, settling time, dan steady state error*) pada berbagai variasi parameter Kp , Ki, dan Kd.

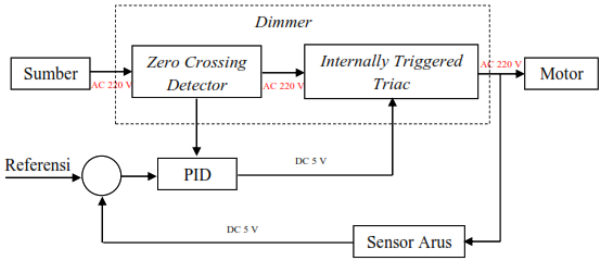
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konversi Tenaga Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan. Secara garis besar, tahapan pelaksanaan penelitian meliputi studi literatur, perancangan dan karakterisasi modul pengendali tegangan (*Zero Crossing Detector* dan *Internally Triggered* TRIAC), kalibrasi sensor arus, perancangan algoritma kontroler PID, implementasi perangkat keras terintegrasi, serta pengujian dan analisis respon transien arus pengasutan motor induksi tiga fasa.

A. Arsitektur Sistem dan Spesifikasi Perangkat Keras

Sistem kendali arus *starting* yang diusulkan dirancang menggunakan konfigurasi umpan balik (*closed-loop system*) sebagaimana diilustrasikan pada blok diagram sistem yang terlihat pada Gambar 1. Sumber tegangan jala-

jala AC 220 V disalurkan menuju modul dimmer yang di dalamnya terintegrasi rangkaian *Zero Crossing Detector* (ZCD) dan *Internally Triggered* TRIAC sebelum terhubung ke terminal beban motor induksi tiga fasa. Objek yang dikendalikan dalam penelitian ini adalah motor induksi tiga fasa merek Gin Re Electric Motor Co., Ltd. (Tipe GR-5IK60A-SF) dengan spesifikasi daya keluaran 60 W, tegangan kerja AC 220 V, arus nominal 0,3 A, dan kecepatan putar 3200 RPM.



Gambar 1. Diagram blok sistem

Komponen utama penyusun sistem kendali terdiri atas tiga subsistem perangkat keras, yaitu:

1. Unit Pengendali Daya (Modul Dimmer AC)

Menggunakan modul dimmer berdimensi fisik 63 mm x 30 mm x 30 mm yang beroperasi pada tegangan AC 110–220 V, frekuensi 50/60 Hz, tegangan logika 3,3–5 V, serta kapasitas arus keluaran 2–5 A. Modul ini memuat rangkaian ZCD untuk mendeteksi titik persilangan nol gelombang tegangan sinusoidal dan komponen *Internally Triggered* TRIAC tipe BTA16 sebagai saklar semikonduktor dua arah untuk memotong sudut fasa tegangan AC.

2. Unit Akuisisi Data Arus (Sensor PZEM-004T)

Pengukuran arus beban secara real-time dilakukan menggunakan modul sensor digital PZEM-004T berdimensi 3,1 cm x 7,4 cm yang dilengkapi trafo arus (*current transformer* / CT) berdiameter 3 mm dengan kapasitas pengukuran arus maksimal hingga 100 A pada rentang tegangan kerja 80–260 VAC.

3. Unit Pemroses Kendali (Mikrokontroler Arduino Uno)

Mikrokontroler Arduino Uno bertegangan kerja 5 V digunakan sebagai pusat pengolahan data sensor sekaligus eksekutor algoritma kontrol PID. Mikrokontroler ini memiliki 14 pin I/O digital (dengan 6 pin di antaranya mendukung keluaran analog/PWM, yakni pin 3, 5, 6, 9, 10, dan 11) serta 6 pin masukan analog.

Dalam implementasi sistem secara keseluruhan untuk motor induksi tiga fasa, perancangan perangkat keras menerapkan arsitektur terdistribusi pada masing-masing fasa (R, S, dan T). Sistem ini mengintegrasikan tiga unit sensor arus PZEM-004T, tiga unit modul dimmer AC, serta enam unit mikrokontroler Arduino Uno, di mana tiga mikrokontroler bertugas mengakuisisi dan mengonversi data arus dari sensor PZEM-004T pada tiap fasa, sedangkan tiga mikrokontroler lainnya memproses algoritma kendali PID dan membangkitkan sinyal pemicuan menuju masing-masing modul dimmer.

B. Kalibrasi Sensor dan Pemodelan Algoritma Kontrol PID

Untuk menjamin keakuratan sinyal umpan balik pada sistem kendali, modul sensor arus PZEM-004T dikalibrasi terlebih dahulu dengan membandingkan nilai arus pembacaan sensor terhadap alat ukur standar (multimeter) pada berbagai variasi beban. Hubungan linieritas antara nilai pembacaan alat ukur (x) dan nilai pembacaan sensor arus (y) dianalisis menggunakan regresi linier untuk memperoleh persamaan koreksi kalibrasi serta nilai koefisien determinasi (R^2), di mana rentang nilai R^2 sebesar 0,80–1,000 mengindikasikan korelasi linieritas yang sangat kuat.

Setelah data arus terkalibrasi, mikrokontroler membandingkan nilai arus aktual beban terhadap nilai arus referensi (*setpoint*) guna memperoleh sinyal kesalahan atau *error* e(t). Sinyal *error* tersebut kemudian diproses oleh kontroler *Proportional Integral Derivative* (PID) yang menggabungkan aksi kendali proporsional, integral, dan derivatif secara paralel [17], [18]. Dalam implementasi pemrograman secara diskrit pada mikrokontroler Arduino Uno, persamaan kendali PID ditransformasikan ke dalam algoritma komputasi numerik.

C. Prosedur Eksperimental dan Skenario Pengujian

Pengujian sistem dilakukan secara bertahap melalui tiga skenario eksperimental untuk memvalidasi kinerja masing-masing subsistem maupun sistem terintegrasi.

1. Pengujian dan Kalibrasi Sensor Arus
   Modul PZEM-004T dihubungkan ke Arduino Uno melalui pin tegangan 5 V, GND, serta pin komunikasi *Software Serial* D11 (TX) dan D12 (RX). Pengujian dilakukan dengan mengukur arus pada beberapa tingkatan beban hingga ~1,45 A untuk mendapatkan kurva regresi kalibrasi, kemudian memvalidasi akurasi pembacaan sensor pada beban uji lampu pijar 15 W / 220 V.
2. Karakterisasi Modul Dimmer (ZCD dan *Internally Triggered* TRIAC)
   Pin VCC dan GND modul dimmer dihubungkan ke pin 5 V dan GND Arduino Uno, sedangkan pin deteksi ZCD dihubungkan ke pin interupsi digital D2 dan pin pemicu PWM dihubungkan ke pin digital D9. Osiloskop digunakan untuk mengamati bentuk sinyal pulsa *Zero Crossing Detector* serta profil terpotongnya gelombang tegangan sinusoidal pada keluaran *Internally Triggered* TRIAC. Selanjutnya, dilakukan variasi nilai *duty cycle* dari 10% hingga 100% (ekuivalen dengan nilai PWM 25,5 hingga 255) menggunakan beban lampu untuk memetakan karakteristik perubahan arus keluaran terhadap *duty cycle*.
3. Pengujian Pengasutan Motor Induksi Tiga Fasa (Metode DOL vs Kontrol PID)
   Pada tahap pertama, motor induksi tiga fasa dioperasikan secara langsung menggunakan metode *Direct On Line* (DOL) tanpa pengendali untuk merekam profil lonjakan arus *starting* sebagai data pembanding (*baseline*). Pada tahap kedua, motor induksi dioperasikan menggunakan sistem kendali PID berbasis *Internally Triggered* TRIAC dengan nilai *setpoint* arus nominal sebesar 0,3 A. Penalaan (tuning) parameter konstanta PID dilakukan secara eksperimental (*trial* and *error*), kinerja stabilitas sistem dievaluasi berdasarkan parameter respon transien yang mencakup waktu tunda (*delay*), waktu naik (*rise time*), waktu puncak (*peak time*), lonjakan

maksimum (*maximum overshoot*), waktu tunak (*settling time*), serta kesalahan keadaan tunak (*steady state error*)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian eksperimental dan evaluasi kinerja sistem kendali arus *starting* motor induksi tiga fasa dilakukan melalui empat tahapan utama, yang meliputi kalibrasi dan validasi akurasi sensor arus PZEM-004T, karakterisasi sinyal penyulutan modul *dimmer* (*Zero Crossing Detector* dan *Internally Triggered TRIAC*), pengujian karakteristik pengasutan motor dengan metode konvensional *Direct On Line* (DOL), serta evaluasi respon transien sistem pengasutan menggunakan kontroler PID pada berbagai variasi parameter penalaan.

A. Hasil Kalibrasi dan Validasi Sensor Arus

Tahap awal pengujian difokuskan pada kalibrasi sensor arus digital PZEM-004T terhadap alat ukur standar (multimeter) guna memastikan keakuratan pembacaan umpan balik arus pada sistem loop tertutup. Pengujian dilakukan pada tujuh variasi titik pembebanan arus, mulai dari 0,03 A hingga 1,42 A. Hasil perbandingan pengukuran antara alat ukur standar dan sensor arus disajikan pada Tabel I.

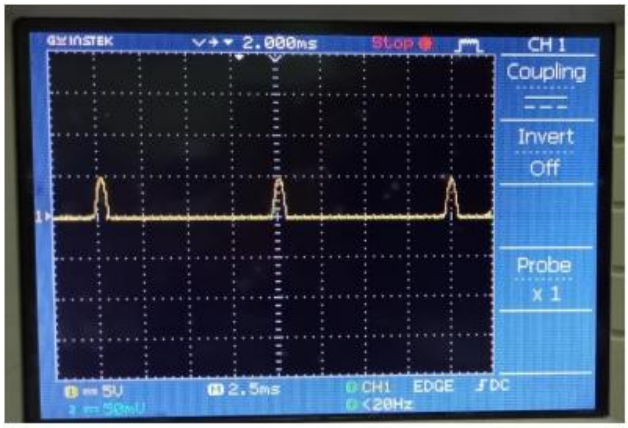
Tabel I
Hasil perbandingan pengukuran antara alat ukur standar dan sensor arus

Alat Ukur (A)	Sensor Arus (A)	Error (%)
0,03	0,03	0,00
0,24	0,25	4,00
0,48	0,49	2,04
0,72	0,73	1,36
0,96	0,97	1,03
1,19	1,21	1,65
1,42	1,45	2,06

Berdasarkan analisis regresi linier terhadap data pada Tabel I, diperoleh persamaan kalibrasi linier $y = 1{,}0167x + 0{,}0008$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9999 (mendekati 1). Nilai R^2 yang berada pada rentang $0{,}80 < R^2 < 1{,}000$ membuktikan bahwa sensor arus PZEM-004T memiliki tingkat korelasi dan linieritas yang sangat kuat terhadap alat ukur standar. Persamaan regresi tersebut kemudian diimplementasikan ke dalam algoritma pemrograman mikrokontroler sebagai faktor koreksi pembacaan sensor. Selanjutnya, total nilai pembacaan sensor y = 5,13 A dan total nilai alat ukur x = 5,04 A, diperoleh nilai *error* rata-rata keseluruhan hanya sebesar 1,75 %. Validasi lebih lanjut menggunakan beban uji resistif berupa satu buah lampu pijar 15 W pada tegangan 220 V menunjukkan arus terukur pada sensor sebesar 0,08 A, yang sangat mendekati nilai perhitungan teoretis sebesar 0,06 A. Hal ini mengonfirmasi bahwa sensor layak digunakan sebagai elemen umpan balik arus.

B. Karakterisasi Modul Dimmer (ZCD dan *Internally Triggered TRIAC*)

Pengujian modul *dimmer* dilakukan dalam dua tahap untuk memverifikasi ketepatan pendeteksian titik nol gelombang AC dan kemampuan regulasi tegangan keluaran oleh *Internally Triggered TRIAC*. Pada tahap pertama, pengamatan menggunakan osiloskop pada keluaran rangkaian *Zero Crossing Detector* menunjukkan pembangkitan sinyal pulsa positif yang periodik dan konsisten setiap kali gelombang tegangan sinusoidal memotong titik nol (*zero-crossing*) yang terlihat pada Gambar 2. Sinyal ini berfungsi sebagai referensi sinkronisasi waktu bagi mikrokontroler untuk menentukan sudut tunda penyulutan (*firing angle*) TRIAC pada setiap setengah siklus gelombang.



Gambar 2. Hasil *Zero Crossing Detector*

Pengujian pemotongan gelombang tegangan AC menggunakan variasi *duty cycle* antara 10% hingga 100% menghasilkan karakteristik arus keluaran terhadap perubahan nilai PWM dan *duty cycle* sebagaimana dirangkum pada Tabel II

Tabel II Karakteristik arus keluaran terhadap perubahan nilai PWM dan *duty cycle*

Nilai Input PWM	*Duty Cycle* (%)	Arus Keluaran (A)
25,5	10	0,009
51,0	20	0,059
76,5	30	0,090
102,0	40	0,115
127,5	50	0,134
153,0	60	0,148
178,5	70	0,159
204,0	80	0,163
229,5	90	0,165
255,0	100	0,166

Peningkatan nilai *duty cycle* dari 10% hingga 100% menghasilkan kenaikan arus keluaran secara proporsional dari 0,009 A hingga maksimum 0,166 A. Pada *duty cycle* 70%, arus tercatat 0,159 A dan mulai saturasi menuju konduksi penuh. Hal ini membuktikan bahwa *Internally Triggered TRIAC* mampu memodulasi daya dan mengatur arus AC secara efektif

C. Analisis Pengasutan Motor Induksi dengan Metode Direct On Line (DOL)

Pengujian motor induksi tiga fasa menggunakan metode *Direct On Line* (DOL) tanpa pengendali PID menunjukkan adanya lonjakan arus *starting* transien yang mencapai puncak sebesar 0,40 A sebelum beroperasi stabil pada arus nominal 0,30 A. Lonjakan arus awal sebesar 33,3% di atas arus nominal pada motor berdaya 60 W ini mengonfirmasi fenomena arus *inrush* saat slip bernilai maksimum.

D. Evaluasi Kinerja Pengasutan Motor Menggunakan Kontroler PID

Untuk meredam lonjakan arus *starting*, sistem kendali loop tertutup berbasis PID dan *Internally Triggered TRIAC* diuji dengan menetapkan *setpoint* arus nominal 0,30 A. Evaluasi dilakukan melalui tiga skenario penalaan parameter PID :

1. Skenario 1 (K_p = *5,* K_i = *0,5,* K_d = *0,002*): Menghasilkan waktu naik yang cepat tetapi memicu lonjakan arus melewati *setpoint* (*maximum overshoot* 13,3% atau ~0,34 A) dan menyisakan kesalahan keadaan tunak 0,03 A .
2. Skenario 2 ($K_p = 4, K_i = 0,2, K_d = 0,002$): Menurunkan *maximum overshoot* menjadi 10% (~0,33 A) dengan respon transien yang lebih lambat, namun kondisi tunak belum konvergen sempurna pada *setpoint*.
3. Skenario 3 ($K_p = 3, K_i = 0,1, K_d = 0,02$): Menghasilkan kenaikan arus yang sangat terkendali tanpa menimbulkan lonjakan sedikit pun (*maximum overshoot* 0%) serta mencapai kestabilan sempurna pada *setpoint* 0,30 A tanpa kesalahan keadaan tunak .

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi perangkat keras, dan pengujian eksperimental yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa modul sensor arus digital PZEM-004T terbukti andal sebagai elemen umpan balik dengan tingkat linieritas dan akurasi tinggi terhadap alat ukur standar, yang ditunjukkan oleh koefisien determinasi R^2 = 0,9999 dan persentase *error* rata-rata kalibrasi sebesar 1,75%. Integrasi rangkaian *Zero Crossing Detector* dan *Internally Triggered TRIAC* pada modul *dimmer* efektif memodulasi sudut penyulutan tegangan AC secara proporsional terhadap variasi sinyal PWM, sehingga mampu membatasi arus yang mengalir ke kumparan stator motor induksi. Penerapan algoritma kontroler PID berhasil mengeliminasi lonjakan arus *starting* (*inrush current*) ekstrem sebesar 0,40 A yang lazim terjadi pada metode pengasutan langsung (*Direct On Line* / DOL). Kinerja sistem paling optimal dicapai pada penalaan parameter Kp = 3, Ki = 0,1, dan Kd = 0,02, yang menghasilkan respon transien stabil dengan *delay time* 16,5 s, *rise time* 31,5 s, *peak time* 34,1 s, serta *settling time* 34,08 s, dan mampu mencapai *setpoint* arus nominal 0,30 A secara presisi tanpa menimbulkan lonjakan arus (*maximum overshoot* 0% dan *steady state error* 0%).

REFERENSI

[1] R. Silaen, "Pengaruh perubahan beban terhadap putaran dan daya masuk motor induksi tiga fasa," Skripsi, Fakultas Teknik, 2017.

[2] R. Arindya, *Penggunaan dan Pengaturan Motor Listrik*. Yogyakarta, Indonesia: Graha Ilmu, 2013.

[3] A. M. Prasetia and H. Santoso, "Implementation of scalar control method for 3 phase induction motor speed control," *Elinvo (Electronics, Informatics, and Vocational Education)*, vol. 3, no. 1, pp. 63–69, 2018.

[4] Z. Anthony, *Mesin Listrik Arus Bolak-Balik Edisi Revisi*. Yogyakarta, Indonesia: Penerbit Andi, 2019.

[5] S. Sultan, A. B. Muljono, and I. M. A. Nrartha, "Visualisasi pengasutan motor induksi tiga fase berbasis programmable logic control," *DIELEKTRIKA*, vol. 4, no. 1, pp. 58–69, 2017.

[6] S. Riyanto and A. Sapriadi, "Analisis pengasutan motor induksi tiga fasa 15 HP menggunakan metode DOL (*Direct On Line*) pada PDAM Juwata Laut Tarakan," *Elektrika Borneo*, vol. 4, no. 2, pp. 11–16, 2018.

[7] D. Riyadi H., A. Warsito, and M. Facta, "Soft *starting* pada motor induksi 3 fasa," Tugas Akhir/Skripsi, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang, Indonesia, 2011.

[8] M. I. P. Naibaho, I. K. Wijaya, and I. M. Mataram, "Studi analisis perbandingan metode *starting Direct On Line* (DOL) dan variabel speed drive (VSD) pada motor fan untuk cooling tower di PT. RAPP (Riau Andalan Pulp Paper)," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 8, no. 1, 2021.

[9] K. Hasto, M. Haddin, and D. Nugroho, "Kendali arus *starting* motor induksi satu fasa menggunakan magnetic energy recovery switch (MERS)," *Media Elektrika*, vol. 8, no. 2, 2015.

[10] A. Saputra, S. Syukriyadin, and M. Syukri, "Perancangan rangkaian pengasutan soft *starting* pada motor induksi 3 fasa berbasis Arduino Nano," *Jurnal Komputer, Informasi Teknologi, dan Elektro (KITEKTRO)*, vol. 2, no. 4, 2017.

[11] M. Ali, *Aplikasi Elektronika Daya pada Sistem Tenaga Listrik*. Yogyakarta, Indonesia: UNY Press, 2018.

[12] F. Djuandi, *Pengenalan Arduino*. E-book: www.tobuku.com, 2011, p. 24.

[13] M. S. Bachtiar, S. B. Mulia, A. Suryadi, and F. S. Hadisusanto, "Perancangan soft *starting* motor induksi satu fasa menggunakan Triac," *Jurnal Rekayasa Teknologi dan Sains Terapan*, vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2019.

[14] *Jenis-Jenis Motor Listrik*, Elektronika Dasar, 2012. [Online]. Tersedia: https://elektronika-dasar.web.id/jenis-jenis-motor-listrik. [Diakses: 9 Jan 2022].

[15] H. Herlan and B. A. Prabowo, "Rangkaian dimmer pengatur iluminasi lampu pijar berbasis *Internally Triggered* TRIAC," *INKOM Journal*, vol. 3, no. 1–2, pp. 14–21, 2010.

[16] L. Sartika, A. M. Prasetia, and D. M. Efendi, "Sistem pengaturan beban generator sinkron 3 fasa otomatis berbasis *Internally Triggered* TRIAC," Jurusan Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Indonesia, 2021.

[17] K. Ogata, *Teknik Kontrol Automatik*, Edisi ke-2, Jilid 1. Jakarta, Indonesia: Prentice Hall / Erlangga, 1970.

[18] F. M. Wildan, E. A. Hakim, and D. Suhardi, "Sistem pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan kontroler PID berbasis Genetic Algorithm," *KINETIK*, vol. 1, no. 1, pp. 23–32, 2016.

[19] W. Waluyo, A. Fitriansyah, and S. Syahrial, "Analisis penalaan kontrol PID pada simulasi kendali kecepatan putaran motor DC berbeban menggunakan metode heuristik," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik,*

Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika, vol. 1, no. 2, p. 79, 2013.

[20] L. Sartika, A. M. Prasetia, and A. Ma'ruf, "Penggunaan PID pada Automatic Voltage Regulator (AVR) untuk kestabilan tegangan terminal generator sinkron 3 fasa," Jurusan Teknik Elektro, Universitas Borneo Tarakan, Tarakan, Indonesia, 2021.

[21] H. Guntoro and Y. Somantri, "Rancang bangun magnetic door lock menggunakan keypad dan solenoid berbasis mikrokontroler Arduino Uno," *Electrans*, vol. 12, no. 1, pp. 39–48, 2013.

[22] *Mengenal PZEM-004T Modul Elektronik untuk Alat Pengukuran Listrik*, NN-Digital, 10 Jul. 2019. [Online]. Tersedia:https://www.nndigital.com/blog/2019/07/10/mengenal-pzem-004t-modul-elektronik-untuk-alat-pengukuran-listrik/. [Diakses: 7 Nov 2021].